



Die „**Sammlung Vieweg**“ hat sich die Aufgabe gestellt, Wissens- und Forschungsgebiete, Theorien, chemisch-technische Verfahren usw., die im Stadium der Entwicklung stehen, durch zusammenfassende Behandlung unter Beifügung der wichtigsten Literaturangaben weiteren Kreisen bekanntzumachen und ihren **augenblicklichen Entwicklungsstand zu beleuchten**. Sie will dadurch die Orientierung erleichtern und die Richtung zu zeigen suchen, welche die weitere Forschung einzuschlagen hat.

Verzeichnis der bisher erschienenen Hefte siehe 3. und 4. Umschlagseite.

Als Herausgeber der einzelnen Gebiete, auf welche sich die Sammlung Vieweg zunächst erstreckt, sind tätig und zwar für:

Physik (theoretische und praktische, und mathematische Probleme):

Herr Professor **Dr. Karl Scheel**, Physikal.-Techn. Reichsanstalt, Charlottenburg;

Kosmische Physik (Astrophysik, Meteorologie und wissenschaftliche Luftfahrt — Aerologie — Geophysik):

Herr Geh. Ober-Reg.-Rat Professor **Dr. med. et phil. R. Assmann** in Gießen;

Chemie (Allgemeine, Organische und Anorganische Chemie, Physikal. Chemie, Elektrochemie, Technische Chemie, Chemie in ihrer Anwendung auf Künste und Gewerbe, Photochemie, Metallurgie, Bergbau):

Herr Professor **Dr. B. Neumann**, Techn. Hochschule, Breslau;

Technik (Elektro-, Maschinen-, Schiffbautechnik, Flugtechnik, Motoren, Brückenbau):

Herr Professor **Dr.-Ing. h. c. Fritz Emde**, Techn. Hochschule, Stuttgart;

Biologie (Allgemeine Biologie der Tiere und Pflanzen, Biophysik, Biochemie, Immunitätsforschung, Pharmakodynamik, Chemotherapie):

Herr Professor **Dr. phil. et med. Carl Oppenheimer**, Berlin-Grunewald.



Br. Glatzel.

ELEKTRISCHE METHODEN
DER
MOMENTPHOTOGRAPHIE

VON

DR. BRUNO GLATZEL

PROFESSOR AN DER K. TECHNISCHEN HOCHSCHULE BERLIN

MIT DEM BILD DES VERFASSERS
UND 51 ABBILDUNGEN



DRUCK UND VERLAG VON FRIEDR. VIEWEG & SOHN
BRAUNSCHWEIG 1915

ISBN 978-3-322-98315-2 ISBN 978-3-322-99032-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-99032-7

Alle Rechte vorbehalten.

Copyright, 1915, by Friedr. Vieweg & Sohn,
Braunschweig, Germany.

Herrn Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. C. Cranz

in Dankbarkeit

gewidmet

Vorwort.

In dieser Arbeit ist zum ersten Male versucht worden, die seit vielen Jahren in der Ballistik angewendeten Methoden der Funkenphotographie, unter Zugrundelegung unserer jetzigen Kenntnisse auf dem Gebiete der Schwingungserzeugung, vom Standpunkte des Physikers aus zu behandeln. Dies erschien deswegen wünschenswert, weil sich im Laufe der Jahre bei zahlreichen Versuchen Schwierigkeiten und Fehlerquellen herausgestellt hatten, welche eine Aufklärung erforderlich erscheinen ließen. Überdies hatte sich gezeigt, daß die Methoden der Funkenphotographie in weiteren Kreisen der Physiker sehr wenig bekannt waren, obwohl sie für zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen auch auf rein physikalischem Gebiet zweifelsohne mit Vorteil verwendet werden könnten. So sind z. B. bereits in den siebziger Jahren in den Wiener Akademie-Berichten von Mach, dem Begründer der elektrischen Momentphotographie, im Verein mit seinen Mitarbeitern einige wertvolle Arbeiten über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Knallwellen unter Benutzung elektrischer Funken-Verzögerungsmethoden veröffentlicht worden. Da Mach selbst aber später nicht die Möglichkeit hatte, auf diesem Gebiete weiter zu arbeiten, so sind seine Arbeiten mehr und mehr in Vergessenheit geraten. Besondere Förderung erfuhren dann in neuerer Zeit die Methoden der Funkenphotographie durch Cranz, welcher sie, besonders seit Beginn seiner Tätigkeit an der Militärtechnischen Akademie, in systematischer Weise durcharbeitete und nach den verschiedensten Richtungen hin weiterbildete, so daß dieses Gebiet heute bereits einen hohen Grad von Vollkommenheit erreicht hat. Er war es, der mir neben zahlreichen Anregungen die Möglichkeit gab, manche der abgeleiteten Resultate experimentell zu prüfen, indem er mir in liebenswürdigster Weise die Einrichtungen seines Laboratoriums und seine reichen Erfahrungen zur Verfügung stellte.

Es ist mir ein Bedürfnis, auch an dieser Stelle Herrn Geheimrat Cranz hierfür meinen verbindlichsten Dank auszusprechen. Ebenso bin ich Herrn Hauptmann Külp, Hilfslehrer am ballistischen Laboratorium der Militärtechnischen Akademie, welcher meine mannigfachen Wünsche ebenfalls stets in liebenswürdigster Weise erfüllte, zu besonderem Dank verpflichtet.

Endlich möchte ich noch kurz auf einige Gesichtspunkte hinweisen, welche mich bei Abfassung der Arbeit geleitet haben und zwar insbesondere bei der Darstellung der Verzögerungsmethoden im Kapitel II. Die dort behandelten Fragen der Ladung und Entladung von Kondensatoren in verschiedenen Versuchsanordnungen spielen auch in der Hochfrequenztechnik eine grundlegende Rolle und daher erschien es mir wertvoll, die Vorgänge in allen Einzelheiten theoretisch und experimentell zu behandeln, auch wenn dies vielleicht an einzelnen Stellen etwas über den Rahmen derjenigen Erfordernisse hinausging, welche für die Anwendung der Methoden auf rein ballistischem Gebiet in Frage kommen. Mit Rücksicht auf die erstrebte Einführung dieser Methoden in die experimentelle Technik der reinen Physik glaubte ich dies jedoch tun zu sollen. Im Zusammenhang hiermit habe ich auch gelegentlich einige kurze Hinweise auf physikalische Anwendungen eingeflochten, allerdings ohne daß es mir möglich gewesen wäre, im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf Einzelheiten einzugehen. Es würde mich freuen, wenn diese Hinweise Anlaß zu weiteren Untersuchungen geben würden.

Wenn ich mir nun auch darüber klar bin, daß ich mit dieser Arbeit noch keineswegs etwas Vollkommenes geliefert habe, da ja hier zum ersten Male versucht worden ist, die einschlägigen Erscheinungen im Zusammenhang zu bearbeiten, so hoffe ich gleichwohl, auch mit diesem Anfang der Sache gedient zu haben und wäre für jede weitere Anregung und eventuelle Berichtigung aus dem Leserkreise zu Dank verpflichtet.

Berlin, im Juni 1914.

Br. Glatzel.



Wenige Tage nach Abfassung der vorstehenden Worte siedelte Glatzel zu einer auf mehrere Wochen berechneten militärischen Übung nach Metz über. Noch vor Ablauf dieser Zeit brach der europäische Krieg aus, der auch Glatzel auf seinen Posten, zunächst im Festungsdienst, stellte. Doch nicht lange litt es ihn, den tatkräftigen Mann, in diesem ihm untergeordnet scheinenden Betriebe; gelegentlich eines Besuches bei seinem in der Front stehenden Regiment wußte er seine Einberufung nach dort durchzusetzen. Noch in den Schützengräben vor Verdun hat Glatzel die Fahnenkorrekturen des vorliegenden Buches gelesen und Anordnungen für die Beendigung des Werkes gegeben; da erreichte ihn das feindliche Geschöß und am 8. Oktober starb er als Führer einer Maschinengewehrkompanie des 8. bayerischen Infanterieregiments im Alter von 36 Jahren den Tod fürs Vaterland.

In Glatzel betrauert die physikalische Welt einen ihrer besten Vertreter. Ausgestattet mit großem experimentellen Geschick hat Glatzel sich mit eisernem Fleiß und glücklicher Hand auf den verschiedensten Gebieten dieser Wissenschaft als Forscher und Lehrer erfolgreich betätigt. Nicht nur die im vorliegenden Buche dargestellte Momentphotographie, auch die drahtlose Telegraphie und die Fernphotographie verdanken ihm wichtige Fortschritte und seine Schüler an der Charlottenburger Technischen Hochschule, an der Militärtechnischen Akademie und an der Ersten Berliner Handwerkerschule haben von ihm manche Anregungen mit ins Leben hinausgenommen.

Wer Glatzel persönlich näher getreten ist, betrauert in ihm einen lieben, allzeit hilfsbereiten Freund, einen, wie im Dienst für das Vaterland, so auch in allen anderen Lebenslagen tatkräftigen und pflichtbewußten Mann. Sein Andenken wird unter uns dauernd lebendig bleiben.

Scheel.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	1
Kapitel I.	
Die Auslösevorrichtungen	6
a) Die Cranzsche Federauslösung	7
b) Die Glashütchenauslösung nach Mach und Schwinning.	8
c) Der Pendelunterbrecher.	12
d) Die Machsche Flammenauslösung	14
e) Die Cranzsche Ionisierungsmethode.	15
f) Die Methode Hilfszündung nach Majorana-Calatabiano	17
Kapitel II.	
Methoden zur Herstellung kleiner Zeitdifferenzen zwischen zwei Funken.	
a) Die Machsche Methode	21
b) Die Töplersche Methode.	42
c) Die Induktormethode	63
Kapitel III.	
Die Beleuchtungsfunkenstrecken	71
Kapitel IV.	
Die Mehrfachfunkenphotographie (Funkenkinematographie)	76
a) Die Vielfachfunkenanordnung von Schwinning	78
b) Der Funkenkinematograph von Bull-Marey	83
c) Der ballistische Kinematograph von Cranz	85
d) Der Hochfrequenzkinematograph nach Cranz-Glatzel.	94
e) Die Schattessesche Methode zur Herstellung hoher Funken- frequenzen	98
Kapitel V.	
Die Momentphotographie mit Vorderbeleuchtung	100

Einleitung.

Wenn auch die Anfänge der elektrischen Momentphotographie — Funkenphotographie — bis in die sechziger Jahre zurückgehen (Arbeiten von Töpler über die Schlierenmethode), so hat sie ihre jetzige große Bedeutung doch erst gewonnen, als es gelang, die modernen Erfahrungen auf dem Gebiete der Hochfrequenztechnik für die elektrische Momentphotographie zu verwerten. Dieser Entwicklung entsprechend soll es eine der Hauptaufgaben dieses Buches sein, die Wirkungsweise der zahlreichen Anordnungen, welche im Laufe der Jahre für Zwecke der Funkenphotographie erdacht worden sind, nach denjenigen Gesichtspunkten zu behandeln, welche jetzt in der Hochfrequenztechnik für die Erzeugung und Ausnutzung elektrischer Schwingungen maßgebend sind. Diese Betrachtungsweise ist auch deswegen zweckmäßig, weil sich bei ihr, wie wir sehen werden, neue Gesichtspunkte ergeben, welche einzelne Methoden der Funkenphotographie umgekehrt auch für die reine Hochfrequenztechnik in vieler Hinsicht wertvoll erscheinen lassen.

Die Hauptaufgabe der elektrischen Momentphotographie besteht darin, Vorgänge aufzunehmen, welche sich so schnell abspielen, daß sie im allgemeinen für unser Auge, jedenfalls in ihren Einzelheiten, vollkommen unsichtbar bleiben. Die Lösung dieser Aufgabe ist bei Anwendung der neuesten Methoden in so weitgehendem Maße gelungen, daß man in der Lage ist, alle mechanischen Vorgänge auch in ihren kürzesten Bewegungsphasen genau zu verfolgen. Infolgedessen stellt die moderne elektrische Momentphotographie ein Hilfsmittel von so hoher Bedeutung für viele Gebiete physikalischer Forschung dar, daß es mir wichtig erschien, die hier benutzten Anordnungen mehr als bisher weiteren Kreisen zugänglich zu machen.

Als Einleitung möchte ich nun zunächst einen kurzen Überblick über die verschiedenen Methoden und ihre Hilfsmittel geben,

ohne dabei jedoch auf Einzelheiten einzugehen, lediglich um dem Leser das Studium der folgenden Kapitel zu erleichtern, indem ihm von vornherein der Zusammenhang derselben untereinander dargelegt wird.

Um die erwähnten außerordentlich kurz dauernden Vorgänge, z. B. die Bewegung eines Geschosses oder die Explosionswirkung irgend eines Körpers mit Hilfe der Photographie festzuhalten, könnte man zunächst daran denken, einen photographischen Apparat mit einem recht schnell arbeitenden Momentverschluß zu versehen und im übrigen eine Aufnahme des betreffenden Vorganges in der üblichen Weise herzustellen. Die praktische Ausführung dieses Gedankens führt aber sofort auf zwei große Schwierigkeiten. Die eine liegt darin, daß es in der Mehrzahl der Fälle nicht möglich ist, mit mechanisch betätigten Momentverschlüssen genügend kurze Belichtungszeiten herzustellen, um ein scharfes Bild des bewegten Gegenstandes zu erhalten; die andere Schwierigkeit bezieht sich darauf, daß es unmöglich ist, den Momentverschluß mechanisch zur richtigen Zeit auszulösen, so daß die gewünschte Phase des Bewegungsvorganges auch wirklich auf der Platte des photographischen Apparates erscheint.

Zunächst wollen wir die erste Schwierigkeit kurz behandeln. Sämtliche Momentverschlüsse besitzen, wie es ja in der Natur jedes mechanisch bewegten Körpers liegt, stets eine gewisse Trägheit, auch wenn man die Masse der arbeitenden Teile so gering als möglich macht. Diese Trägheit ist im Vergleich zu den Zeiten, in denen die oben erwähnten Vorgänge ablaufen, so groß, daß scharfe Momentaufnahmen nicht erzielt werden können. Am besten erhält man einen Begriff von den Anforderungen, welche hier an die Kürze der Momentbelichtung gestellt werden müssen, wenn man z. B. die Aufgabe betrachtet, ein modernes Infanteriegeschloß, welches eine Geschwindigkeit von 800 bis 900 m/sec hat, im Fluge zu photographieren. Nehmen wir einmal der Einfachheit halber an, das Geschloß besäße eine Geschwindigkeit von 1000 m pro Sekunde, so legt es in 10^{-3} Sek.: 1 m, in 10^{-6} Sek.: 1 mm zurück. Nehmen wir weiter an, daß unser photographischer Apparat das Geschloß in wahrer Größe abbildet und lassen wir dabei zu, daß das Geschloßbild sich während der Aufnahme um 0,1 mm verschiebt — eine Unschärfe, welche für das Auge schon deutlich sichtbar ist —, so dürfen wir unter diesen immerhin

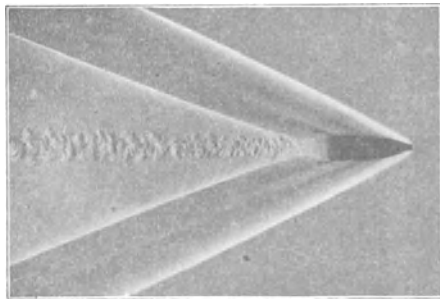
noch nicht allzustrengen Anforderungen eine Belichtungsdauer von höchstens 10^{-7} Sekunden anwenden. Aber auch dann würde die Aufnahme noch keineswegs weitgehenden Ansprüchen genügen. Es ist nun ohne weiteres klar, daß sich derartig kurze Belichtungszeiten mit mechanisch betätigten Momentverschlüssen¹⁾ überhaupt nicht erzielen lassen.

Sieht man also von allen derartigen Anordnungen ab, so kann man sich zunächst die Frage vorlegen, ob sich nicht vielleicht mit Hilfe von Blitzpulvern genügend kurze Belichtungszeiten erreichen lassen. Aber auch dieser Gedanke verspricht, wie Messungen ergeben haben, keinen Erfolg. Die Verbrennungsdauer der üblichen Blitzpulver ist nämlich verhältnismäßig groß und schwankt je nach der Zusammensetzung des Pulvers zwischen 0,01 und 0,002 Sek. Also auch auf diesem Wege haben wir keine Aussicht, zu dem gewünschten Ziele zu gelangen.

Hier setzt nun der geistvolle Gedanke E. Machs ein, welcher, fußend auf den Arbeiten von Töpler, im Jahre 1887 zum ersten

Male den elektrischen Funken zur Herstellung von Photographien fliegender Geschosse verwendete. Mach fand bei seinen Versuchen, daß die Schwierigkeiten, genügend kurze Belichtungszeiten herzustellen, bei Verwendung des elektrischen Funkens verhältnismäßig gering sind, und daß ein solcher Funke bei richtiger Wahl der elektrischen Verhältnisse einen Lichtblitz darstellt, welcher hinsichtlich Kürze der Zeit den weitestgehenden Ansprüchen genügt. Diese hiermit von ihm begründete „Funkenphotographie“ hat dann in der Folgezeit, insbesondere auf ballistischem Gebiet zu früher ungeahnten Resultaten geführt, auf die später noch im einzelnen eingegangen werden wird. Eine nach dem Machschen Verfahren

Fig. 1.



¹⁾ Über die höchsten mit mechanischen Momentverschlüssen erreichten Leistungen, sowie über die historische Entwicklung der Momentphotographie und Kinematographie s. C. Cranz, Lehrb. d. Ballistik, Bd. III, S. 295. Leipzig-Berlin, B. G. Teubner, 1913.

in Verbindung mit der Töplerschen Schlierenmethode hergestellte Aufnahme ist in Fig. 1 wiedergegeben¹⁾.

Die praktische Ausführung des Machschen Gedankens führt nun zu der oben erwähnten zweiten Schwierigkeit, welche darin besteht, den Beleuchtungsfunken im richtigen Augenblick auszulösen, nämlich so, daß das Geschößbild wirklich auf der photographischen Platte erscheint. Man braucht hierzu Auslösevorrichtungen, welche erstens sehr schnell und zweitens auch mit großer Pünktlichkeit hinsichtlich des Beginns der Auslösung arbeiten. Am sichersten und einfachsten gelangt man hier zum Ziele, wenn man das Geschöß selbst oder die dasselbe treibenden Pulvergase zur Auslösung des Beleuchtungsfunkens benutzt. Die verschiedenen hier in Betracht kommenden Anordnungen sind in dem ersten Kapitel besprochen.

Jede derartige Auslösevorrichtung, wie immer sie nun auch gestaltet sein mag, darf aber nicht etwa so arbeiten, daß der Beleuchtungsfunke in dem gleichen Augenblick entsteht, in welchem die Auslösung erfolgt, denn dann würden wir in der Mehrzahl der Fälle das Geschöß nicht frei fliegend, sondern innerhalb der Auslösevorrichtung photographieren, was natürlich für viele Zwecke ein großer Mangel wäre. Der Beleuchtungsfunke muß vielmehr mit einer je nach Bedarf größeren oder kleineren Zeitdifferenz nach erfolgter Auslösung einsetzen. Diese Zeitdifferenzen sind, absolut genommen, wiederum sehr klein, müssen aber gleichwohl mit möglichst großer Genauigkeit und Konstanz einstellbar sein, zum mindesten innerhalb derjenigen Grenzen, welche dadurch gegeben sind, daß das Geschöß im Augenblick der Belichtung sich noch in dem Bildraume der photographischen Einrichtung befindet. Die hierfür geeigneten Methoden (Verzögerungsmethoden), welche teils mechanischer, teils elektrischer Natur sind, sind in dem zweiten Kapitel behandelt.

Wie die zuerst erwähnte Schwierigkeit, die Dauer der Belichtung so kurz als möglich zu machen, damit man auch bei den schnellsten Vorgängen noch scharfe Bilder erhält, auf elektrischem Wege zu beseitigen ist, bzw. weitgehend herabgemindert

¹⁾ Diese Aufnahme wurde im ballistischen Laboratorium der Militärtechnischen Akademie, Laboratoriumsvorsteher Geh.-Rat Cranz, von Hauptmann Kulp angefertigt und zeigt in besonders schöner Weise die „Kopf-“ und „Schwanzwellen“ des bewegten Geschosses.

werden kann, wird bei der Besprechung der verschiedenen elektrischen Schaltungen, welche in der Funkenphotographie Verwendung finden, dargelegt werden. Soweit hierbei die mechanische Konstruktion der Funkenstrecken eine Rolle spielt, sind die maßgebenden Grundsätze in dem dritten Kapitel auseinandergesetzt. Im wesentlichen stellt dieses Kapitel aber nur die praktische Verwertung der in den vorhergehenden Kapiteln abgeleiteten theoretischen Gesichtspunkte dar.

Bisher haben wir uns nur mit der Aufgabe beschäftigt, eine einzige Phase des sich abspielenden Vorganges durch einen einzigen Funken festzuhalten, mit der „Einfachfunkenphotographie“. Für viele, ja die Mehrzahl der Fälle, ist es aber von größter Wichtigkeit, nicht nur eine Phase des Vorganges zu erhalten, sondern die ganze Erscheinung in ihrer Entwicklung verfolgen zu können. Die Lösung dieser Aufgabe führt zu der „Mehrfachfunkenphotographie“, welche in ihrer höchsten Ausbildung es ermöglicht, eine kinematographische Bilderserie des Vorganges herzustellen, die dann bei der Wiedergabe mit verringelter Geschwindigkeit es gestattet, in Muße die Entwicklung der Erscheinung zu beobachten. Mit dieser Mehrfachfunkenphotographie bzw. „Funckenkinematographie“ beschäftigt sich das vierte Kapitel. Allerdings wird auch schon bei den Methoden der Einfachfunkenphotographie (zweites Kapitel) an einzelnen Stellen darauf hingewiesen werden, daß und wie sich die dort beschriebenen Methoden teilweise ebenfalls für Zwecke der Mehrfachfunkenphotographie verwenden lassen.

Bei allen diesen Methoden, sowohl der Einfach- wie auch der Mehrfachfunkenphotographie, entsteht nun stets ein Schattenbild, bei welchem lediglich die Umrisse des aufzunehmenden undurchsichtigen Gegenstandes wiedergegeben werden. Für viele Fälle wird dieses „Silhouettenverfahren“ wohl immer seinen Wert behalten. Es treten aber auch, insbesondere auf dem Gebiete der Ballistik, Aufgaben an den Experimentator heran, bei denen die Erkennung von Einzelheiten innerhalb des Schattenrisses erwünscht ist. Dies führt dann zu der Forderung, die Funkenphotographie noch nach der Richtung hin auszugestalten, daß auch Aufnahmen mit Vorderbeleuchtung, d. h. also Aufnahmen, wie man sie gewöhnlich mit photographischen Apparaten herstellt, ermöglicht werden. Die Verfahren, welche hierfür in Frage kommen, hängen im wesentlichen

davon ab, ob es gelingt, so helle Beleuchtungsfunken zu erzeugen, daß auch das diffus von dem aufzunehmenden Gegenstand zurückgeworfene Licht noch genügt, um Photographien herzustellen.

Dies ist kürzlich, nachdem bereits im Jahre 1909 von C. Cranz einige diesbezügliche erfolgreiche Vorversuche unternommen worden waren, im ballistischen Laboratorium der Charlottenburger Militärtechnischen Akademie für Einzelaufnahmen in besonders schöner Weise gelungen, und auch einige Versuche, kinematographische Aufnahmen mit Vorderbeleuchtung herzustellen, sind erfolgreich gewesen. Alle bisherigen Erfahrungen auf diesem Gebiete sind im fünften Kapitel mitgeteilt.

Die weitere Entwicklung der Funkenphotographie dürfte jedenfalls nach der Richtung hin gehen, die Methoden der Vorderbeleuchtung ebenso auszugestalten, wie die bereits vorhandenen, welche nach dem Schattenverfahren arbeiten.

Erstes Kapitel.

Die Auslösevorrichtungen.

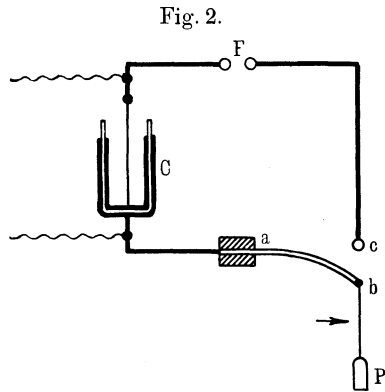
In diesem Kapitel soll nur eine kurze übersichtliche Aufzählung der verschiedenen Auslösemethoden gegeben werden, welche bei ballistischen Untersuchungen Anwendung finden, während ihre elektrischen Eigentümlichkeiten im Zusammenhang mit den verschiedenen Funkenerzeugungsmethoden behandelt werden.

Betrachten wir zunächst die rein mechanischen Vorrichtungen, welche geeignet sind, unter Benutzung der Geschößbewegung die Auslösung eines Beleuchtungsfunkens herbeizuführen. Eine der ersten, welche von Cranz 1901 bei ballistischen Untersuchungen angewendet worden ist, stellt schematisch Fig. 2 dar. In dieser bedeutet C eine Kapazität (Leidener Flasche), welche, z. B. von einer Influenzmaschine, aufgeladen wird. In den Schließungskreis der Flasche ist die Beleuchtungsfunkentrecke F und die Auslösevorrichtung abc eingeschaltet. Der Pfeil gibt die Flugrichtung des Geschosses an. Die Auslösevorrichtung selbst besteht aus einer kräftigen Stahllamelle ab , deren freies Ende durch ein Gewicht P oder eine Feder nach unten gezogen wird. Das Ende

der Lamelle ist auf diese Weise so weit von dem Kontakt c entfernt, daß die Influenzmaschine nicht imstande ist, die beiden im Entladekreis der Kapazität hintereinander geschalteten Funkenstrecken F und bc zu überbrücken. Erst wenn das Geschoß den Faden zerreißt, welcher das Ende der Lamelle mit dem Gewicht bzw. der Feder verbindet, und infolgedessen die Lamelle nach oben schlägt, wird die zweite Funkenstrecke bc so stark verkürzt, daß die Entladung der Kapazität und damit der Beleuchtungsfunke bei F einsetzt.

Die erforderliche Verzögerung zwischen der Auslösung und dem Einsetzen des Beleuchtungsfunkens ist hierbei durch die Zeit gegeben, welche die Lamelle braucht, um bis zur Durchschlagsstellung der Funkenstrecke bc zu gelangen. In erster Annäherung kann man, wie dies auch Cranz getan hat, diese Verzögerung aus den Dimensionen der Lamelle und dem Elastizitätsmodul berechnen.

Läßt sich aus räumlichen Gründen die Auslösevorrichtung nicht in der Nähe der Geschoßbahn anbringen, so kann man die Stahllamelle auch mit Hilfe eines Elektromagneten in der tiefen Stellung festhalten. In den Stromkreis des Elektromagneten wird dann ein Draht (schmaler Kupferstreifen) eingeschaltet, welchen das Geschoß zerreißt. Hierdurch wird der Strom im Elektromagneten¹⁾ unterbrochen, und die Stahllamelle schnellt nach oben. Diese Auslösevorrichtung hat jedoch den Nachteil, daß die entstehenden Verzögerungen des Beleuchtungsfunkens starke Schwankungen zeigen. Der Überbrückungsfunke bc schlägt nämlich je nach dem Potential der Influenzmaschine, welches nie



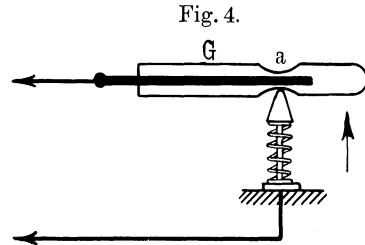
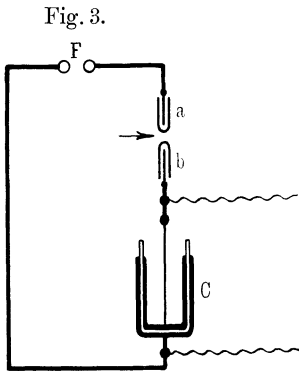
¹⁾ Alle derartigen Zwecken dienende Elektromagnete müssen, um ein Festhaften des Ankers an den Kernen infolge des remanenten Magnetismus zu verhindern, so konstruiert sein, daß der Anker nicht in direkte Berührung mit dem Eisen der Pole gelangt, am einfachsten dadurch, daß in die Pole kleine Kupferstäbchen, die ein klein wenig über die Polflächen hinausragen, als Distanzstücke eingesetzt werden.

ganz konstant zu halten ist, und je nach den zufälligen Änderungen der Entladespannung der Funkenstrecke bc selbst, etwa hervorgerufen durch Veränderungen der Oberfläche der Kontakte, bald früher, bald später über. Die praktische Verwendung dieser Auslösevorrichtung bietet also viele Schwierigkeiten und deshalb ist sie auch bald wieder verlassen worden, um so mehr, als später bessere Auslöse- und Verzögerungsmethoden aufgefunden wurden. Der Vollständigkeit halber möge aber noch ein hiermit in Zusammenhang stehender Vorschlag von H. Boas Erwähnung finden, welcher den erwähnten Nachteil der obigen Auslösevorrichtung beseitigen soll. Boas läßt nämlich den Auslösefunken bc nicht frei in Luft zwischen dem Kontakt c und der bewegten Lamelle b überspringen, sondern schaltet zwischen beide noch eine isolierende Platte, z. B. eine Glimmerscheibe, ein, welche von einem an dem Ende der Stahllamelle angebrachten Bolzen durchschlagen wird. Erst nach dem Durchschlagen der Isolation kann der Funke in bc einsetzen. Auf diese Weise ist die Unsicherheit, daß der Funke bald bei größeren, bald bei kleineren Abständen auftritt, nahezu vollkommen beseitigt. Die Auslösung des Schlagbolzens kann natürlich auch in diesem Falle entweder mechanisch oder elektromagnetisch in Verbindung mit dem Geschoß erfolgen.

Zu den rein mechanischen Auslösevorrichtungen, welche zur Überbrückung einer Trennungsstelle im Entladekreis der Kapazität verwendet werden, ist ferner die Machsche Glashütchenauslösung von 1885 zu rechnen, welche in Fig. 3 dargestellt ist. Über die Enden a und b der Auslösefunkenstrecke sind einseitig geschlossene Glasröhrchen geschoben, so daß eine Entladung zwischen a und b verhindert wird. Sobald nun das Geschoß die Glashütchen zertrümmert, setzt der Auslösefunke und damit auch der Beleuchtungsfunke ein.

In etwas anderer Form wurde die Glashütchenauslösung später, 1903, von Schwinning verwendet (Fig. 4). Die eine Elektrode wird in Form eines dicken Stabes in ein Glasrohr G eingeführt, welches an der Stelle a etwas verengt ist. Hier liegt unter Federdruck die zweite Elektrode an. Sobald nun das Geschoß, in der Pfeilrichtung fliegend, auf das Glasrohr auftritt, wird dieses zertrümmert, und die beiden Kontakte kommen zur Berührung. Beide Einrichtungen haben den Vorzug, daß unter allen Umständen ein vorzeitiges Auslösen des Beleuchtungsfunkens ver-

hindert wird, während dies z. B. leicht erfolgen kann, wenn eine einfache Auslösefunkenstrecke ohne isolierende Schutzhütchen in größerer Nähe der Mündung aufgestellt wird und nun die vor dem Geschoß den Lauf verlassenden heißen Gase eine vorzeitige Entladung durch Ionisierung der Funkenstrecke *ab* herbeiführen. Allerdings besitzt die Machsche Auslösvorrichtung an sich keine Verzögerung, so daß sie nur in Verbindung mit besonderen elektrischen Verzögerungseinrichtungen (vgl. zweites Kapitel) verwendet werden kann. Dazu kommt noch ein weiterer Nachteil, welcher darin besteht, daß Glashütchen mit dem Geschoß mitfliegen und auf diese Weise in das Gesichtsfeld des photographischen Apparates gelangen, wo sie die Aufnahme stören. Auch kann leicht



das Geschoß selbst kleine Beschädigungen erleiden, welche seine Bahn beeinflussen, ganz abgesehen von dem unvermeidlichen Verlust an Bewegungs-

energie, welche das Geschoß beim Zertrümmern der Glashütchen erfährt. Muß die Auslösung in größerer Entfernung von der Mündung erfolgen, so ist die hier geschilderte Methode nur noch schwer zu verwenden, weil es nicht immer bei jedem Schuß gelingt, die Glashütchen zu treffen. Für derartige Fälle benutzt man besser zwei mit Stanniol bespannte Holzrahmen, welche in einem Abstand, der etwas kleiner als die Geschoßlänge ist, hintereinander in der Schußrichtung aufgestellt werden. Bei Anwendung größerer Funkenspannungen, bei welchen der Abstand der beiden Stanniolschirme nicht genügt, um mit Sicherheit ein vorzeitiges Überschlagen zu verhindern, muß man eine beiderseits mit Stanniol beklebte Glasplatte¹⁾ benutzen, bei deren Durch-

¹⁾ Paraffinplatten zu verwenden empfiehlt sich nicht, da man bei diesen bisweilen Explosionswirkungen im Paraffin erhält.

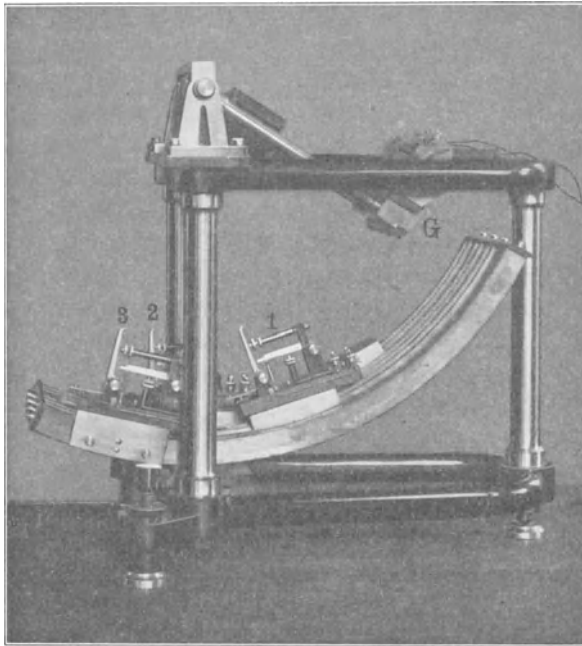
schießung ebenfalls eine Verbindung der beiden Pole der Auslösefunkenstrecke herbeigeführt wird. Alle diese Auslösevorrichtungen, welche, wie bereits erwähnt, nur in Verbindung mit den elektrischen Verzögerungsmethoden benutzt werden, zeigen nun aber besondere elektrische Eigentümlichkeiten, welche ihre Verwendung unter Umständen unmöglich machen bzw. nicht ratsam erscheinen lassen. Es zeigt sich nämlich, wie in dem zweiten Kapitel auf Grund von Versuchen eingehend auseinandergesetzt werden wird, daß die bei der Durchschießung z. B. des Glases gebildeten zahlreichen Glasteilchen die elektrischen Eigenschaften der Auslösefunkenstrecke erheblich beeinflussen, und zwar jedenfalls in dem Sinne, daß man keine rein oszillatorische Funkenentladung mehr erhält, sondern eine Entladungsform, wie sie z. B. in Schwingungskreisen mit idealen Löschfunkenstrecken auftritt, also ohne Oszillationen. Da nun aber, wie wir sehen werden, alle sicher arbeitenden elektrischen Methoden zur Herstellung von Zeitdifferenzen zwischen dem Auslöse- und dem Beleuchtungsfunken auf dem Vorhandensein bestimmter Oszillationsvorgänge beruhen, so sind die oben beschriebenen Methoden zur Betätigung der Auslösefunkenstrecke für diese Anordnungen nicht oder doch nur in ganz bestimmten Fällen verwendbar. Es ist aber ohne weiteres möglich, sowohl diese letztere Schwierigkeit wie auch den Mangel, daß das Geschloß in seiner Bewegung behindert wird, zu beseitigen, wenn man einfach zwischen zwei Kugeln hindurchschießt, welche in einem solchen Abstand voneinander aufgestellt sind, daß erst die Verkürzung der Funkenstrecke durch das hindurchfliegende Metallgeschloß genügt, um den Auslösefunken zum Einsetzen zu bringen. Die Verwendung von Kugeln ist erforderlich, weil andernfalls durch die bei hoher Spannung stets auftretenden Spitzenentladungen Unsicherheiten in dem Einsetzen der Funkenstrecke hervorgerufen werden. Allerdings läßt sich diese Auslösemethode nur verwenden einerseits, wenn man nicht zu nahe an die Mündung herangehen muß, wo ja, wie bereits erwähnt, leicht ein vorzeitiges Auslösen durch die heißen Pulvergase erfolgen kann, und andererseits, wenn die Entfernung von der Mündung nicht zu groß gewählt werden muß, weil dann das sichere Hindurchschießen schwierig ist. Der letztere Fall kommt allerdings praktisch weniger in Frage, da man ja stets in der Lage ist, die gewünschten späteren Zeitmomente durch geeignete Wahl der

Verzögerungszeit zwischen Auslöse- und Beleuchtungsfunken einzustellen.

Alle bisher geschilderten Methoden beruhen auf dem Prinzip der Stromschließung. Dieses Prinzip läßt sich aber nur mit Erfolg anwenden, wenn man es mit hohen Spannungen und schwachen Strömen zu tun hat. Bei niedrigen Spannungen und größeren Stromstärken ist es zweckmäßiger und betriebssicherer, das Prinzip der Stromunterbrechung auszunutzen. Dies ist z. B. der Fall, wenn man einen Funkeninduktor zur Erzeugung des Beleuchtungsfunkens verwenden will. Hierbei wird die Anordnung dann so getroffen, daß das Geschoß den Primärstromkreis unterbricht und auf diese Weise die zur Aufladung der Sekundärkapazität, welche sich ihrerseits über eine Funkenstrecke entlädt, nötige Spannung erzeugt. Die Hauptschwierigkeit besteht dann darin, den Abfall des Primärstromes möglichst rapide zu machen, um sekundär genügende Energie für den Beleuchtungsfunken zu erhalten. Da die hierfür maßgebenden Gesichtspunkte aber im engsten Zusammenhang mit der Wirkungsweise des Induktors selbst stehen, so soll auf Einzelheiten erst bei Besprechung derjenigen Anordnungen eingegangen werden, bei welchen ein Induktor zur Erzielung von Verzögerungen verwendet wird (zweites Kapitel). Der rein mechanische Teil dieser Auslösevorrichtungen besteht in seiner einfachsten Form aus einem schmalen Kupferstreifen, welchen das Geschoß beim Auftreffen zerreißt. Da es hierbei aber immerhin möglich ist, daß der Kupferstreifen nicht vom Geschoß getroffen wird, insbesondere wenn die Auslösung in größerer Entfernung von der Mündung erfolgt, so ist es häufig empfehlenswert, an Stelle des einfachen Kupferstreifens einen Rahmen zu verwenden, welcher mit parallel nebeneinander liegenden Kupferdrähten bespannt ist, die in dem Primärstromkreis des Induktors liegen und sämtlich hintereinander geschaltet sind. Die einzelnen Drähte dürfen dabei nicht um mehr als ein Drittel des Geschoßkalibers voneinander entfernt sein, damit das Geschoß nicht etwa zwischen zwei Drähten hindurchschlüpfen kann. Da dies aber bei den modernen Spitzgeschossen und bei der verhältnismäßig großen Nachgiebigkeit von Kupferdrähten doch noch bisweilen vorkommen kann, so sind von Benschberg für diesen Zweck Gitter vorgeschlagen worden, welche aus stark gehärteten, möglichst spröden Stahlnadeln gebildet sind.

Diese springen stets beim Auftreffen des Geschosses und unterbrechen mit Sicherheit den Stromkreis. Sie haben sich in dieser Hinsicht recht gut bewährt. Ein Nachteil haftet jedoch diesen Auslösevorrichtungen ebenso wie allen denjenigen an, bei welchen mechanische Wirkungen durch das Geschöß erzeugt werden müssen, daß nämlich das Geschöß selbst beschädigt oder aber doch wenigstens in seiner Bewegung gehemmt wird. Aus diesem Grunde

Fig. 5.



sind im allgemeinen diejenigen Auslösungen zu bevorzugen, bei welchen dem Geschöß selbst keine Bewegungsenergie entzogen wird.

Eine andere, von Cranz, hauptsächlich in Verbindung mit seinem ballistischen Kinematographen (viertes Kapitel), verwendete mechanische Auslöse- und Verzögerungsvorrichtung ist der auch bei physikalischen Untersuchungen zur Herstellung kleiner Zeitdifferenzen mehrfach benutzte Helmholtzsche Pendelunterbrecher. Allerdings mußte derselbe für die besonderen Zwecke der Ballistik besonders umkonstruiert werden. Ein derartiger Apparat, welcher in der Werkstatt der Militärtechnischen Akademie gebaut wurde,

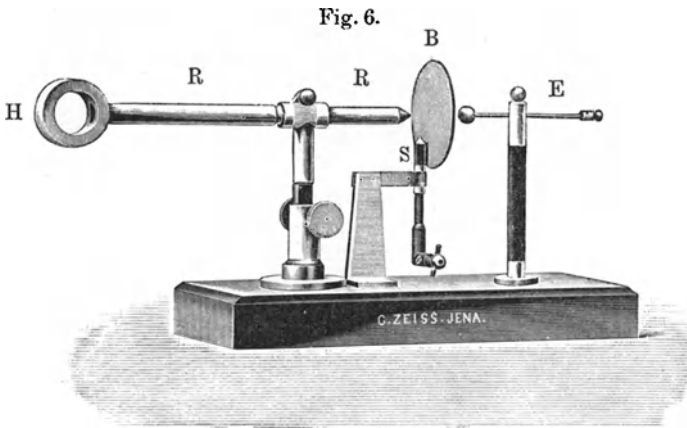
ist in Fig. 5 wiedergegeben. Das Pendelgewicht G wird in der höchsten Stellung entweder mechanisch oder elektromagnetisch festgehalten. Nachdem es losgelassen ist, trifft es der Reihe nach auf die Schaltkontakte 1, 2, 3 ... und betätigt diese in rascher Aufeinanderfolge. Durch passende Wahl des Abstandes zwischen den einzelnen Kontakten kann man beliebige berechenbare Zeitdifferenzen einstellen. Der erste Kontakt kann zum Beispiel dazu dienen, auf elektromagnetischem Wege den Schuß abzufeuern, während der zweite mit der gewünschten Zeitdifferenz den Beleuchtungsfunken auslöst. Der dritte Kontakt ist erforderlich, um, wenn man durch Kontakt 2 eine Serie von Funken zum Einsetzen gebracht hat, nach einer gewissen Zeit wieder die Ausschaltung der Beleuchtungsfunken herbeizuführen. Mit derartigen Pendelunterbrechern lassen sich ziemlich große Zeitintervalle beherrschen, so z. B. bei einem speziell für Untersuchungen in Hochfrequenzkreisen nach Angaben von Prof. Kleiner gebauten Pendelunterbrecher¹⁾ das relativ große Zeitintervall 10^{-6} bis etwa 0,5 Sekunden. Die kleinsten Zeitdifferenzen bei diesem Apparat werden mittels Mikrometerschraube eingestellt, wobei 1 Skalenteil $1,71966 \cdot 10^{-6}$ Sekunden bedeutet. Die Genauigkeit des Apparates ist so groß, daß sich noch innerhalb eines Skalenteiles Messungen ausführen lassen. Um derartige Meßgenauigkeiten zu erreichen, muß jedoch der Apparat mit größter Sorgfalt eingestellt und behandelt werden, was naturgemäß große Übung erfordert. Wenn man also andere Hilfsmittel zur Verfügung hat, welche mit gleicher Genauigkeit in bezug auf die Verzögerung arbeiten, dabei aber in der Behandlung einfacher sind, so wird man diese im allgemeinen vorziehen, und tatsächlich werden wir auch Vorrichtungen elektrischer Natur kennen lernen, welche wohl geeignet sind, für die meisten Zwecke der Ballistik den Pendelunterbrecher voll zu ersetzen.

Ich komme nun zur Besprechung zweier Auslösevorrichtungen, welche teils mechanischer, teils elektrischer Natur sind. Die erste rührt von L. Mach her und ist nach einer Konstruktion der Firma Carl Zeiß in Fig. 6²⁾ dargestellt. Sie hat den Zweck,

¹⁾ G. Eichhorn, Jahrb. d. drahtl. Telegraphie u. Telephonie **1**, 369 (1907) und F. Rusch, ebenda, S. 373.

²⁾ Die Firma Zeiß liefert die gesamte optische und elektrische Apparatur zur Photographie fliegender Geschosse nach Mach.

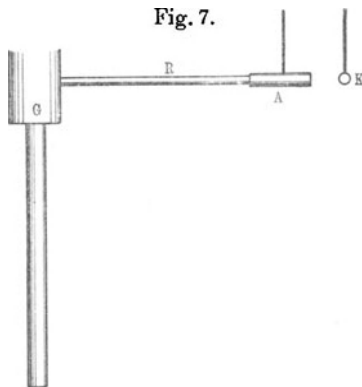
eine Auslösefunkenstrecke, ähnlich derjenigen in Fig. 2, zum Einsetzen zu bringen, jedoch so, daß das Geschöß in keiner Weise mit Metallteilen in Berührung kommt, welche seine Bewegung hemmen bzw. sein Material irgendwie beschädigen können. Auch soll vermieden werden, daß Trümmer der Auslöseteile (vgl. die Mache'sche Glashütchenauslösung) in die Geschößbahn hineingelangen. Die Vorrichtung arbeitet folgendermaßen: Ein hölzerner¹⁾ Ring *H* wird in der Schußrichtung so aufgestellt, daß das Geschöß frei hindurchfliegen kann. Der Ring trägt seitlich ein metallisches Ansatzrohr *R*, welches an seinem anderen Ende in eine Spitze



ausmündet. Dicht vor dieser Spitze brennt eine Flamme *F*, z. B. die eines Bunsenbrenners. Auf der anderen Seite der Flamme *F* befindet sich eine Blende *B*, welche in der Mitte eine feine Bohrung enthält. Während nun der eine Pol der Auslösefunkenstrecke an das Rohr *R* angeschlossen ist, wird der andere an eine verschiebbare Elektrode *E* angelegt, welche in solchem Abstand dem Ende von *R* gegenübersteht, daß gerade kein Überschlag erfolgen kann. Sobald nun das Geschöß durch den Ring *H* hindurchfliegt, bläst die durch das Rohr *R* sich fortpflanzende Druckwelle (Kopfwelle) des Geschößes (vgl. Fig. 1) die Flamme *F* durch die Blendenöffnung zur anderen Elektrode *E* hinüber. Die heißen

¹⁾ Metallteile sind der bei einem eventuellen Auftreffen des Geschößes gefährlichen Splitterwirkung wegen nach Möglichkeit in der Nähe der Geschößbahn zu vermeiden.

Flammengase, welche auf diese Weise in die Funkenbahn hineingelangen, ionisieren die Funkenstrecke und vermindern dadurch ihr Entladungspotential so stark, daß sofort der Spannungsausgleich durch den Funken erfolgt. Auch in dieser Auslösevorrichtung liegt bereits eine gewisse Verzögerung, da der beim Durchfliegen des Ringes *T* durch das Geschloß erzeugte Luftstoß eine bestimmte Zeit braucht, um die Länge des Rohres *R* zurückzulegen. Diese Zeit ist aus der Rohrlänge und der Schallgeschwindigkeit, mit welcher sich ja der Luftstoß fortpflanzt, zu berechnen. In manchen Fällen wird die so erzielte Verzögerung bereits genügen, um das Geschloß an der gewünschten Stelle zu photographieren, im allgemeinen wird es jedoch wünschenswert sein, größere Verzögerungen einstellen zu können. Eine Vergrößerung der Länge des Rohres *R* führt aber deswegen nicht zum Ziel, weil die Energie des Luftstoßes schnell abnimmt und dann nicht mehr genügt, die Flamme zur Seite zu blasen. Man muß daher durch besondere Schaltungen auf elektrischem Wege größere Zeitdifferenzen herstellen, wie dies



auch schon Mach in Verbindung mit dieser Auslösevorrichtung getan hat (vgl. zweites Kapitel). In diesem Falle wird man natürlich das Rohr *R* möglichst kurz machen, um eine sichere Auslösung zu erzielen.

Eine zweite Methode, bei welcher ebenfalls die Ionisierung der Auslösefunkenstrecke durch heiße Gase benutzt wird, ist neuerdings von Cranz angegeben worden. Sie hat jedoch gegenüber der Machschen Auslösung den großen Vorzug, daß bei ihr erheblich mehr Energie zur Verfügung steht, so daß man auch ohne Anwendung elektrischer Verzögerungsmethoden genügende Zeitdifferenzen zwischen der Auslösung und dem Aufblitzen des Beleuchtungsfunkens einstellen kann. Schematisch ist diese Vorrichtung in Fig. 7 dargestellt, In dieser bedeutet *G* eine Schußwaffe, z. B. ein Gewehr. Etwas vorwärts des Patronenlagers¹⁾ ist

¹⁾ Unter Umständen wird das Ansatzrohr auch über die Mündung der Waffe geschoben; ein Anbohren des Laufes ist alsdann nicht notwendig.

seitlich der Lauf der Waffe angebohrt und an diese Bohrung ein Rohr R angeschlossen, dessen Länge durch Ansatzstücke A oder übergeschobene Metallhülsen beliebig eingestellt werden kann. Mit diesem Ansatzrohr ist der eine Pol der Auslösefunkenstrecke verbunden. Der andere Pol liegt an der dem Rohrende gegenüberstehenden Kugelelektrode K . Das Rohrende selbst ist, um nach Möglichkeit alle Ausstrahlung von Elektrizität während der Aufladung der Kapazität zu verhindern, gut abgerundet. Feuert man nun den Schuß ab, so dringt ein kleiner Teil der hochgespannten heißen Pulvergase durch die seitliche Bohrung in das Ansatzrohr und ionisiert bei dem Austritt aus dem Rohr die Auslösefunkenstrecke so stark, daß die Entladung einsetzt. Da der Gasdruck und die Temperatur der Gase recht hoch sind, kann man ziemlich beträchtliche Rohrlängen, bis zu 2 m, verwenden und dementsprechend große Verzögerungen einstellen. Diese Auslösevorrichtung hat ganz besondere Bedeutung für alle diejenigen Untersuchungen, bei denen es sich z. B. darum handelt, diejenigen Erscheinungen photographisch aufzunehmen, welche sich an der Mündung der Waffe abspielen, bevor das Geschöß selbst den Lauf verlassen hat (Ausströmung von Pulvergase usw.). Für derartige Zwecke, bei welchen man also das Geschöß selbst nicht zur Auslösung verwenden kann, ist diese Cranzsche Methode von großem Wert, um so mehr, als keine der anderen Auslösemethoden für diese Fälle brauchbar ist. Die Konstanz der so erzielten Verzögerungen wird eine recht gute, wenn man dafür sorgt, daß der Querschnitt der seitlichen Anbohrung genügend groß ist, so daß er nicht durch Pulverschleim allzusehr verändert wird. Es empfiehlt sich aus diesem Grunde, die Bohrung nicht zu klein zu wählen. Eine Messungsreihe, welche bei den ersten Versuchen nach dieser Methode aufgenommen ist, möge nachstehend wiedergegeben werden, um die auftretenden Fehler auch zahlenmäßig zu belegen. Für eine bestimmte Länge des Ansatzrohres wurden folgende Abstände in Zentimetern zwischen der Lage der Spitze eines S-Geschosses und der Gewehrmündung für den Moment der Belichtung gefunden:

113,1 113,3 113,9 112,8 112,2 112,8 111,8 113,1.

Aus diesen Werten ergibt sich als größte Abweichung vom Mittelwert für den einzelnen Schuß 1,1 cm. Neuere Erfahrungen mit dieser Auslösevorrichtung haben gezeigt, daß sich die Genauigkeit

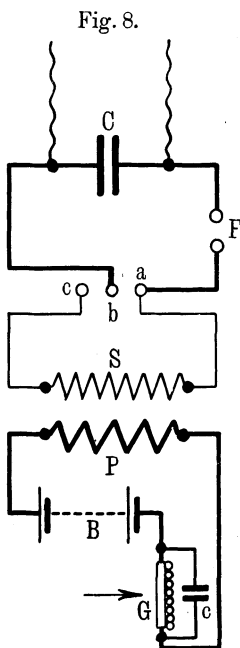
noch weiter steigern läßt, so daß man einen maximalen Schwankungsbereich erzielen kann, der noch unterhalb eines Zentimeters liegt.

Zum Schluß müssen wir noch eine rein elektrische Auslösevorrichtung besprechen, welche voraussichtlich für die Mehrfachfunkenphotographie mit großen Energiemengen, Vorderbeleuchtungs-kinematographie (fünftes Kapitel), wertvoll sein wird und auch in der Einfach-Funkenphotographie bereits vielfach angewendet worden ist. Dieselbe rührt von Q. Majorana-Calatabiano und A. Fontana¹⁾ her. Sie ist in Fig. 8 dargestellt. C bedeutet wiederum den Kondensator, welcher von einer Influenzmaschine aufgeladen wird und mit der Beleuchtungsfunkenstrecke F und der Auslösefunkenstrecke ab zu einem Entladekreis zusammengeschaltet ist. Die Funkenstrecke ab ist ebenso wie bei den mechanischen Auslösemethoden so eingestellt, daß die Ladenspannung des Kondensators C nicht genügt, um F und ab zu durchschlagen. Außerhalb der Funkenstrecke ab ist nun noch eine dritte Elektrode c angebracht, und an diese sowie an die Elektrode a wird die Sekundärwicklung S eines kleinen Zündinduktors angeschlossen. Die Primärwicklung P dieses Induktors enthält z. B. einen Gitterrahmen G nach Bensberg, welcher beim Hindurchfliegen des Geschosses den Strom der Batterie unterbricht. Mit einer kleinen Verzögerung, welche von den elektrischen Konstanten des Induktors abhängig ist (vgl. zweites Kapitel), setzt dann der Sekundärfunke ein und führt die Entladung des Kondensators über den Beleuchtungsfunken F herbei²⁾. Diese Methode hat gegenüber den früher erwähnten Auslösemethoden,

¹⁾ Q. Majorana-Calatabiano und A. Fontana, Rivista d'artigl. e gen. 1, 106, 1896. Diese Schaltung arbeitet in derselben Weise wie die neuerdings in der drahtlosen Telegraphie verwendete Methode der „Hilfszündung“, vgl. Br. Glatzel, Methoden zur Erzeugung von Hochfrequenzenergie, Verlag Hachmeister und Thal, 1913, S. 55.

²⁾ Zur Erklärung dieses Vorganges hat man bisher angenommen, daß die Luftstrecke ab durch den Funken des Zündinduktors ionisiert und auf diese Weise die Durchschlagsspannung für die Entladung des Kondensators C herabgesetzt wird. Nach einigen kürzlich angestellten Vorversuchen ist die Ionisierung jedenfalls nicht der einzige Grund. Es scheint, als ob für das Einsetzen der Entladung auch Oszillationsvorgänge eine Rolle spielen, wie sie z. B. im zweiten Kapitel bei der Machschen und bei der Töplerschen Schaltung behandelt sind. Eine endgültige Klärung können erst die in Aussicht genommenen späteren Versuche ergeben.

bei denen die Hilfsfunkenstrecke durch das Geschoß direkt überbrückt wurde, den Vorteil, daß hier in der Auslösevorrichtung nur ein äußerst kleiner, fast vollkommen unsichtbarer Funke entsteht,



welcher auf die photographische Platte nicht einwirkt, während Hochspannungsfunken, z. B. bei der Glashütchenauslösung, infolge ihrer größeren Energie stets die Gefahr einer Verschleierung der photographischen Platte mit sich bringen, insbesondere dann, wenn, wie z. B. bei dem Schattenschlierenverfahren von Boys, kein durch Linsen begrenztes Gesichtsfeld vorhanden ist. Bei der praktischen Ausführung des Verfahrens empfiehlt es sich, nicht zu kleine Energiemengen für die Zündung zu verwenden, da anderenfalls die durch den Sekundärfunken des Zündinduktors bewirkte Ionisierung¹⁾ der Funkenstrecke ab zu klein ist, um mit Sicherheit die Entladung des Kondensators C zum Einsetzen zu bringen. Andere Schwierigkeiten, welche bei dieser Schaltung durch die Verwendung des Induktors bedingt sind, werden später im zweiten Kapitel eingehend besprochen werden, ins-

besondere ist die Parallelschaltung eines geeigneten Kondensators c zu erwähnen, um eine möglichst plötzliche Unterbrechung des Primärstromes herbeizuführen.

Zweites Kapitel.

Methoden zur Herstellung kleiner Zeitdifferenzen zwischen zwei Funken.

Alle brauchbaren Methoden zur Herstellung von Zeitdifferenzen zwischen zwei Funken sind an das Auftreten von Oszillationen in geeignet geschalteten Schwingungskreisen, welche Selbstinduktion und Kapazität enthalten, gebunden. Diese Oszillationen können entweder bei Entladung von Kapazitäten (Machsche

¹⁾ Vgl. Anmerkung 2 auf S. 17.

Methode) oder bei Ladung von Kapazitäten (Töplersche Methode) entstehen. Umgekehrt kann man im allgemeinen aus dem Auftreten zweier mit einer gewissen Zeitdifferenz nacheinander einsetzenden Funken auf das Vorhandensein von Oszillationen schließen. Dabei ist es für das Prinzip naturgemäß gleichgültig, ob diese Zeitdifferenz direkt gemessen oder auf indirektem Wege nachgewiesen wird. Es ist nun interessant, daß bereits im Jahre 1858 von Knochenhauer¹⁾ in den Wiener Sitzungsberichten eine schöne Versuchsreihe veröffentlicht wurde, durch welche das Vorhandensein von Oszillationen bei der Entladung von Leidener Flaschen experimentell nachgewiesen, aber infolge der damals noch recht ungeklärten Vorstellungen über diese Vorgänge nicht richtig gedeutet wurde, obwohl Knochenhauer, wie aus seiner Arbeit hervorgeht, zuerst auf dem richtigen Wege war. Mit Rücksicht darauf, daß diese Arbeit es vom historischen Standpunkt aus verdient, der Vergessenheit entzogen zu werden, sei es mir gestattet, etwas näher auf sie einzugehen.

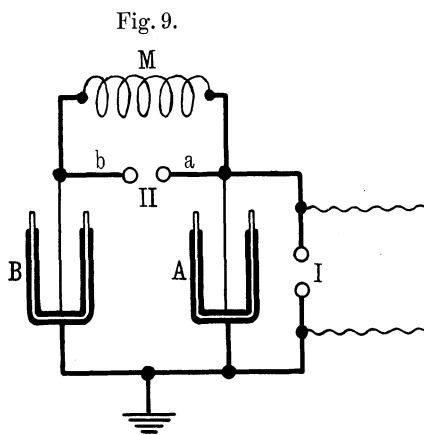
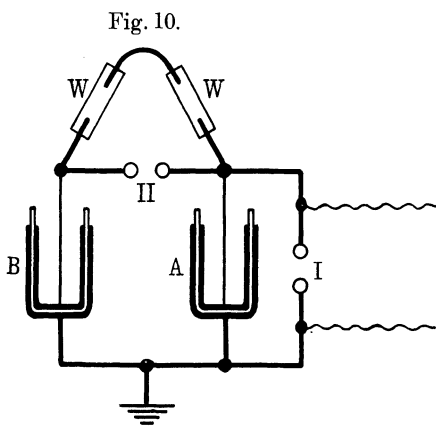


Fig. 9 stellt die von Knochenhauer verwendete Versuchsanordnung dar. Zwei Leidener Flaschen *A* und *B* sind mit ihren äußeren Belegungen zusammengeschaltet und an den einen Pol der Funkenstrecke *I* angeschlossen. Dieser Pol wurde geerdet. Die inneren Belegungen sind über eine lange Spule *M* miteinander und ferner die innere Belegung von *A* mit dem zweiten Pol der Funkenstrecke *I* verbunden. Außerdem führen zwei kurze Leitungen *a* und *b* von den beiden inneren Belegungen zur Funkenstrecke *II*. Die von einer Elektrisiermaschine kommenden Drähte sind an die Enden der Funkenstrecke *I* angeschlossen. Während der Aufladung haben dann offenbar beide Flaschen *A* und *B* stets dieselbe Spannung und zwischen den Elektroden der Funkenstrecke *II*

¹⁾ Knochenhauer, Wien. Sitzber., math.-naturw. Abt., **33**, 163 (1858).

ist keine Spannungsdifferenz vorhanden. Sobald nun die Entladung der Flaschen über die Funkenstrecke *I* einsetzte, entstand auch bei *II* ein Funke, welcher bei großer Länge der Spule *M* nahezu auf den doppelten Abstand übersprang als der Funke in *I*. Knochenhauer sagt bei der Erklärung seiner Messungsergebnisse, „es scheine *A* noch die ganze positive Ladung zu besitzen, während *B* auf eine nahe ebenso starke negative Ladung zurückgegangen sei“. Auf die weiter von ihm auf Grund der damaligen Elektrizitätstheorien entwickelten Anschauungen einzugehen, erübrigt sich, da diese Knochenhauer trotz seiner zuerst ausgesprochenen Vermutung, welche, wie wir sehen werden, vollkommen richtig war, auf falsche Wege führten. Diese Knochenhauer-



schen Untersuchungen wurden dann später, im Jahre 1874, wieder von Oettingen aufgenommen und in sehr schöner, einwandfreier Weise zum Nachweis der Entstehung von Oszillationen bei der Entladung von Leydener Flaschen benutzt. Um die Versuchsanordnung einwandfreier zu gestalten, ersetzte er zunächst die Spule *M* der Knochenhauer-schen Schaltung durch einen

Wasserwiderstand *W* (Fig. 10), bestehend aus zwei je 1 m langen, mit destilliertem Wasser gefüllten Glasröhren, deren allerdings sehr geringe Leitfähigkeit gerade genügte, um bei langsamer Elektrizitätszufuhr beide Flaschen *A* und *B* gleichmäßig zu laden. Daß dies tatsächlich der Fall war, daß also an der Funkenstrecke *II* keine Spannungsdifferenz auftrat, konnte dadurch nachgewiesen werden, daß *II* zunächst auf eine Länge von 0,1 mm eingestellt wurde und trotzdem bei langsamer Aufladung kein Funke erschien. Sobald aber die Entladung bei *I* einsetzte, traten bei *II* Funken auf, welche stets erheblich größere, im Idealfall doppelte Spannungsdifferenz als die Entladung bei *I* hatten. Um mich nicht wiederholen zu müssen, will ich jedoch an dieser Stelle nicht auf den Mechanismus der Entladung im einzelnen eingehen, sondern

dies erst bei Besprechung der Machschen Verzögerungsschaltung tun, welche prinzipiell vollkommen mit der Knochenhauer-Oettingenschen Schaltung übereinstimmte, nur in ihrer Anwendung einen anderen Zweck verfolgte, insofern, als es Mach darauf ankam, zwei Funken zu erhalten, welche mit einer bestimmten Zeitdifferenz nacheinander einsetzten, während Oettingen die Schaltung zum Nachweis der Existenz von Oszillationen benutzen wollte.

a) Die Machsche Verzögerungsmethode.

E. und L. Mach¹⁾ hatten sich eingehend mit der Ausbreitung der Knallwellen beschäftigt, welche von einem elektrischen Funken erzeugt werden. Um diese in verschiedenen Ausbreitungsstadien photographisch festhalten zu können, brauchten sie Beleuchtungsfunken, die etwas später als die Knallwellenfunken auftraten, so daß sie also vor der Aufgabe standen, zwei Funkenentladungen herzustellen, welche mit einer bestimmten, wenn möglich regulierbaren Zeitdifferenz nacheinander einsetzten. Die Lösung gelang Mach unter sinngemäßer Anwendung der oben kurz beschriebenen Knochenhauer-Oettingenschen Methode. Da Mach als erster diese Anordnung zur Herstellung kleiner Zeitdifferenzen angewendet hat, so ist sie für diese Zwecke unter dem Namen „Machsche Verzögerungsschaltung“ in die Literatur übergegangen. Prinzipiell unterscheidet sie sich in keiner Weise von der Knochenhauer-Oettingenschen Methode. Der erste, welcher diese Anordnung auf ballistische Untersuchungen angewendet hat, war C. Cranz. Im Laufe der Zeit wurde dann die Machsche Methode ein nahezu unentbehrliches Hilfsmittel bei der Herstellung von Geschoßaufnahmen mittels Funkenphotographie. Bei diesen zahlreichen Untersuchungen wurde nun stets festgestellt, daß die Methode nur unter ganz bestimmten Versuchsbedingungen brauchbare Resultate ergibt, ohne daß jedoch die Gründe für diese Schwierigkeiten in einwandfreier Weise angegeben worden waren. Um endlich einmal die Ursachen dieser häufig und bisweilen recht

¹⁾ Über die betreffenden Arbeiten von E. Mach und seinen Schülern vgl. die Ber. d. Wien. Akad., Abt. 2a, **92**, 625 (1885); **95**, 765 (1887); **97**, 1045 (1888); **98**, 41, 1257, 1303, 1310, 1333 (1889); **101**, 5, 977 (1892); **102**, 1035 (1893); **105**, 605 (1896). (Dort die bekannten vorzüglichen Geschoßaufnahmen von L. Mach.)

störend auftretenden Unsicherheiten aufzufinden, welche, wie später auseinandergesetzt werden soll, keineswegs im Prinzip der Methode liegen, habe ich nun kürzlich eine größere Anzahl von Untersuchungen angestellt und glaube, hierbei einen großen Teil der möglichen Fehlerquellen aufgedeckt zu haben und gleichzeitig auch, auf Grund unserer neuen Kenntnisse über Funkenentladungen die mehrfach aufgetretenen Abweichungen erklären zu können.

Fig. 11.

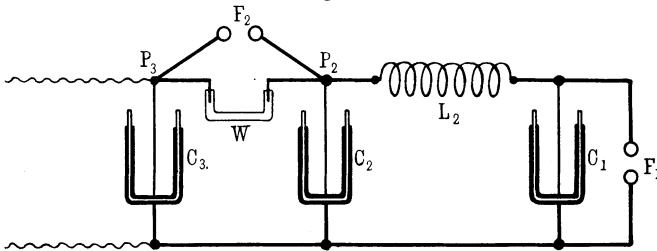
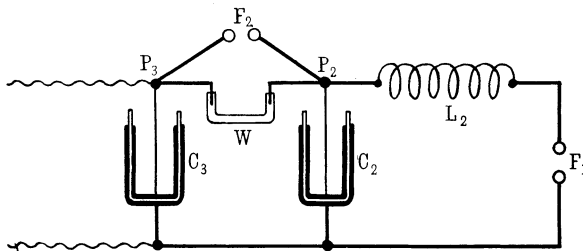


Fig. 11 stellt die von E. und L. Mach benutzte Schaltung dar, welche wir zunächst in der einfacheren, auch von Cranz ursprünglich benutzten Form der Fig. 12 betrachten wollen, da sich bei dieser die Schwingungsvorgänge übersichtlicher darstellen

Fig. 12.



lassen. Es mag aber jetzt schon darauf hingewiesen werden, daß aus später zu erläuternden Gründen in der Praxis stets die ursprüngliche Machsche Schaltung nach Fig. 11, d. h. also mit der eingeschalteten Kapazität C_1 , angewendet wird. Die Kapazitäten C_2 und C_3 , bestehend aus Leidener Flaschen, sind parallel geschaltet, jedoch in der Weise, daß, während die äußeren Belegungen direkt miteinander verbunden sind, die Verbindung der inneren über einen Wasserwiderstand W erfolgt. Die Kapazität C_2 ist dann ihrerseits über eine Selbstinduktion L_2 und eine

Funkenstrecke F_1 zu einem geschlossenen Schwingungskreis zusammengeschaltet. Parallel zu dem Wasserwiderstand W liegt eine zweite Funkenstrecke F_2 , deren Entladung gegenüber derjenigen von F_1 um eine bestimmte meßbare Zeitdifferenz verzögert werden soll. Die Aufladung der beiden parallel geschalteten Kapazitäten C_2 und C_3 erfolgt entweder durch eine Hochspannungsbatterie oder durch eine Influenzmaschine. Sind nun die Kapazitäten auf die Entladespannung von F_1 aufgeladen, so wird bei F_1 ein Funken einsetzen, und die auf C_2 befindliche Elektrizitätsmenge wird sich über die Selbstinduktion L_2 und die Funkenstrecke F_1 oszillatorisch¹⁾ entladen, und zwar mit einer Schwingungsdauer

$$T = 2\pi\sqrt{L_2 C_2}.$$

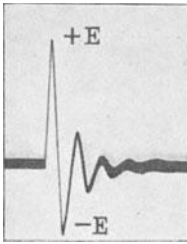
Die Kapazität C_3 dagegen wird sich, da der Wasserwiderstand fast vollkommen isoliert, nicht oder nur wenig entladen, ja man wird es erreichen können, daß das Potential P_3 auch während der Entladung von C_2 ungeändert bleibt, wenn die Zufuhr an Elektrizität durch die Batterie bzw. Influenzmaschine gerade den Abfluß über den Wasserwiderstand W ausgleicht. Wir können also für unsere weiteren Betrachtungen annehmen, daß bei P_3 der Anfangswert des Potentials kurz vor dem Einsetzen des Funkens in F_1 sowohl dem Vorzeichen wie auch der Größe nach erhalten bleibt. Wir wollen weiterhin die vorläufige Annahme machen, daß die im Kreise $C_2 L_2 F_1$ entstehenden Schwingungen sehr schwach gedämpft sind. Dann wird das Potential im Punkt P_2 , welches vor dem Einsetzen der Entladung den Wert $+E$ gehabt haben mag, nach einer halben Periode sein Vorzeichen umkehren und den Wert $-E$ erreichen (vgl. Fig. 13).

Je stärker gedämpft die Schwingung im Kreise $C_2 L_2 F_1$ ist, um so kleiner wird der absolute Wert von $+E$ gegenüber $-E$ sein. Da nun nach dem oben Gesagten das Potential im Punkt

1) An dieser Stelle muß auf einen Irrtum hingewiesen werden, welcher sich in der Arbeit von Schatte, „Über eine Vorrichtung zur Auslösung der Beleuchtungsfunken bei der Photographie fliegender Geschosse“ [Zeitschr. f. d. ges. Schieß- u. Sprengstoffw. 6 (1911)] findet. Schatte behauptet nämlich, daß durch die „Drosselspule“ L_2 keine Schwingungen hindurchgehen, vielmehr die Entladung aperiodisch ist. Letzteres ist natürlich nur dann der Fall, wenn große Widerstände im Kreise liegen, anderenfalls ist die Entladung stets oszillatorisch.

P_3 seinen Wert $+E$ auch während der Entladung von C_2 beibehält, so wird für den theoretischen Fall ungedämpfter Schwingungen nach einer Halbschwingung zwischen den Punkten P_3 und P_2 eine Spannungsdifferenz $2E$ herrschen. Da aber praktisch

Fig. 13.



stets eine gewisse Dämpfung vorhanden ist, so wird das Verhältnis der Einsatzspannungen der Funkenstrecken F_2 und F_1 im allgemeinen kleiner als 2 sein. Will man diese Verhältnisse messend verfolgen, so muß man stets sorgfältig darauf achten, daß beide Funkenstrecken genau die gleiche geometrische Form haben, weil ja das Entladungspotential stark von dem Krümmungsradius der Elektroden beeinflusst wird.

Da nun bereits seinerzeit von Oettingen hierüber sehr sorgfältige Messungen ausgeführt worden sind, so habe ich auf eine Wiederholung derselben verzichtet und gebe in der folgenden Tabelle einen Teil der Oettingenschen Resultate wieder.

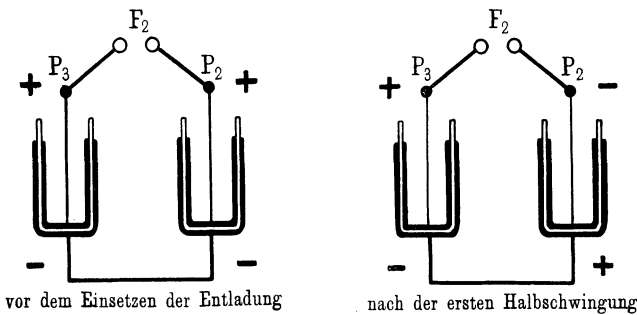
F_1 mm	F_2 mm	F'_1 Sp.-E.	F'_2 Sp.-E.	$\frac{F'_2}{F'_1}$
1	1,75	5,8	10,6	1,72
2	3,7	11,7	10,2	1,68
3	5,2	16,0	25,2	1,58
4	7,5	20,5	34,4	1,68
6	12,0	28,4	48,7	1,73
8	17,0	36,3	59,2	1,63
10	23,0	42,5	72,5	1,71
12	29,0	48,7	83,1	1,71
14	41,0	53,1	90,8	1,73
16	49,0	57,1	97,8	1,73

In den ersten beiden Spalten sind die direkt gemessenen Schlagweiten der beiden Funkenstrecken F_1 und F_2 in Millimetern angegeben. Da nun aber zwischen der Schlagweite und der Spannungsdifferenz keine Proportionalität besteht, so mußten die wahren Spannungswerte noch durch besondere Versuche ermittelt werden. Oettingen führte dies in der Weise durch, daß er die für die verschiedenen Schlagweiten erforderlichen Ladungen bestimmte, aus denen er dann die wahren Spannungswerte berechnen konnte. Auf diese Weise sind die dritte und vierte Spalte erhalten,

wobei die Spannungen F_1' und F_2' in einer willkürlichen Einheit (Sp.-E.) angegeben sind. Die fünfte Spalte endlich enthält das Verhältnis $\frac{F_2'}{F_1'}$ der Spannungen an beiden Funkenstrecken. Man sieht, daß dieses größer als 1, aber infolge der Dämpfung kleiner als 2 ist¹⁾.

Stellt man die Einsatzspannung der Funkenstrecke F_2 gerade auf den Maximalwert ein, so wird F_2 eine halbe Schwingungsdauer nach dem Beginn der Entladung von C_2 , d. h. mit einer Verzögerung von T_2 gegenüber der Funkenstrecke F_1 einsetzen. Dabei arbeitet F_2 , wie nochmals hervorgehoben werden mag, mit nahezu der doppelten Einsatzspannung $2E$ gegenüber der einfachen E in der Funkenstrecke F_1 . Diese Verdoppelung der

Fig. 14.



Entladespannung an F_2 in dem Grenzfall ungedämpfter Schwingungen im Kreise $C_2 L_2 F_1$ kann man sich auch noch in anderer Weise entstanden denken. Solange der Aufladevorgang andauert, sind die beiden Kapazitäten C_1 und C_2 parallel geschaltet und werden jede auf eine Spannungsdifferenz E aufgeladen. Wenn nun der oszillatorische Entladevorgang in F_1 einsetzt, so haben die beiden Belegungen von C_2 nach einer halben Schwingungsdauer ihre Vorzeichen gewechselt, und wir haben jetzt die beiden Kapazitäten C_2 und C_3 im Sinne einer Spannungssteigerung hintereinander geschaltet (Fig. 14).

Wir erhalten also zwischen den beiden Punkten P_2 und P_3 die Spannung $2E$. Diese Erklärung, welche schon von Mach

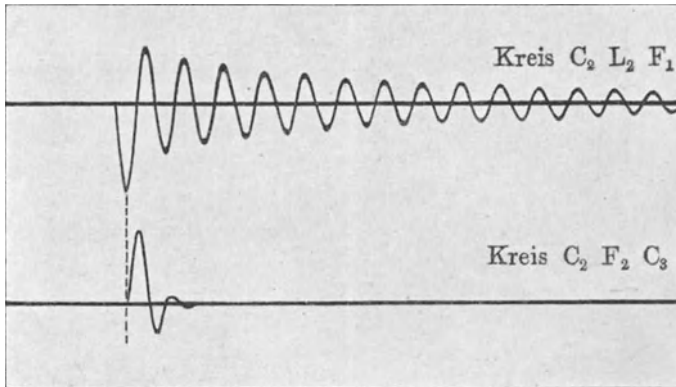
¹⁾ Für die Untersuchung von Schwingungskreisen ließe sich aus dem Verhältnis der Einsatzspannungen an F_1' und F_2' eine Methode zur Dämpfungsmessung ableiten.

herrührt, ist jedoch, wenn sie auch für den Idealfall ungedämpfter Schwingungen im Kreise $C_2 L_2 F_1$ durchaus zutrifft, für gedämpfte Schwingungen, wie sie ja in praktisch ausgeführten Kreisen stets vorhanden sind, und auch, wie wir im folgenden sehen werden, stets vorhanden sein müssen, wenn wir in F_2 einen einzigen Beleuchtungsfunken erhalten wollen, nicht so übersichtlich wie die erste an Hand der Fig. 12 und 13 gegebene Erklärung. Wir wollen daher unseren weiteren Betrachtungen auch nur diese zugrunde legen.

Zunächst erschien es mir wünschenswert, die oben über das spätere Einsetzen der Entladung in F_2 gegenüber F_1 entwickelte Anschauung noch durch oszillographische Aufnahmen zu bestätigen. Um dies aber bei Verwendung eines S- u. H-Oszillographen ermöglichen zu können, mußte vor allem darauf Bedacht genommen werden, die Schwingungsdauer des Kreises $C_2 L_2 F_1$ so zu wählen, daß sie noch genügend weit unterhalb der Eigenschwingungsdauer der Meßschleife (Frequenz etwa 8000) blieb. Es wurde dementsprechend die Schaltung der Fig. 11 unter Benutzung großer Selbstinduktionen und Kapazitäten ($L_2 = 3,4$ Henry, $C_1 = 400\,000$ cm, $C_2 = 100\,000$ cm, $C_3 = 20\,000$ cm) zusammengestellt. Die Funkenstrecke F_1 wurde durch einen Schalter ersetzt, während für F_2 eine sehr kurze Löschfunkenstrecke von 0,05 mm Plattenabstand Verwendung fand. Die Aufladung der Kapazitäten erfolgte mit Gleichstrom von etwa 600 Volt. Bei dieser Spannung, welche also die Einsatzspannung der Funkenstrecke F_1 ist, erhält man nach dem Einsetzen der Entladung in F_1 , d. h. also im vorliegenden Falle beim Schließen des Schalters, und zwar nach Ablauf von etwa einer halben Schwingungsdauer im Kreise $C_2 L_2 F_1$ an F_2 eine gerade noch zum Durchschlagen genügende Spannung von etwa 1000 Volt. Die beiden Oszillographenschleifen waren so eingeschaltet, daß sie den Stromverlauf in den Kreisen $C_2 L_2 F_1$ und $C_2 C_3 F_2$ registrierten. Dabei ist noch folgendes zu beachten: Die Schwingungsdauer im Kreise $C_2 L_2 F_1$ konnte ohne Schwierigkeit so groß gewählt werden, daß eine richtige Aufzeichnung des Schwingungsvorganges durch die Oszillographenschleife erfolgte. Die Schwingungsdauer im Kreise $C_2 C_3 F_2$ dagegen war entsprechend den auch bei der Machschen Schaltung vorhandenen Bedingungen, auf die später noch des näheren eingegangen werden soll, erheblich kleiner und lag weit oberhalb der Eigenschwingungsdauer der Schleife. Dazu

kommt noch, daß durch die vorzügliche Löschwirkung der Funkenstrecke F_2 die entstehenden Oszillationen sofort vernichtet werden und infolgedessen die in diesem Kreise liegende Schleife gleichsam nur einen einzigen Anstoß erhält. Diesem Stoß folgt die Schleife, schwingt aber dann, da sie nicht vollkommen aperiodisch gedämpft ist, mit ihrer Eigenschwingungsdauer allmählich wieder in die Ruhelage zurück. Die in dem Oszillogramm der Fig. 15 zu beobachtenden Oszillationen im Kreise der Funkenstrecke F_2 stellen also nicht die Oszillationen des Kreises, sondern die Eigenschwingungen der Schleife dar. Um Mißverständnissen vorzubeugen, mußte hierauf noch besonders hingewiesen werden. Für den Zweck

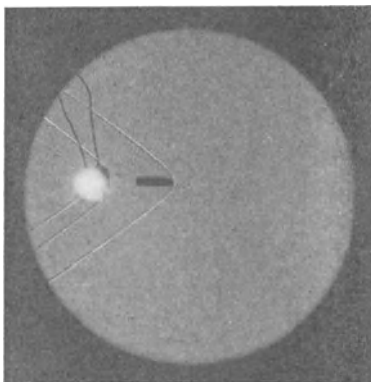
Fig. 15.



unserer jetzigen Betrachtungen kommt jedoch nur der Augenblick des Einsetzens der Funkenstrecke F_2 in Betracht, welcher durch den Ausschlag der Schleife genau festgelegt ist, so daß wir auf die späteren Bewegungen der Schleife keine Rücksicht zu nehmen brauchen. Ferner ist bei dem Oszillogramm noch zu beachten, daß die Schleifen in der gewählten Schaltung den Stromverlauf und nicht den Spannungsverlauf, welcher den Betrachtungen bei Beginn dieses Abschnittes zugrunde gelegt war, aufzeichnen. Die Kurve der Oszillationen im Kreise $C_2 L_2 F_1$ beginnt daher nicht mit dem Maximalwert, sondern mit Null. Die Kurven, welche den Spannungsverlauf an den Kondensatoren C_2 und $C_2 C_3$, d. h. also an den Funkenstrecken F_1 und F_2 darstellen, hat man sich dementsprechend um 90° in der Phase verschoben zu denken. Da es uns aber lediglich auf die Zeitdifferenz im Einsetzen der Funken-

strecken F_1 und F_2 ankommt, so gelangen wir naturgemäß ebenso gut zum Ziele, wenn wir den Verlauf der Ströme in den beiden Funkenstrecken F_1 und F_2 messen. Die Fig. 15 läßt nun deutlich die zeitliche Verzögerung im Einsetzen der Funkenstrecken erkennen. Sie beträgt bei den oben angegebenen Verhältnissen der Versuchsanordnung $1,16 \cdot 10^{-3}$ Sek. oder bezogen auf die Schwungungsdauer des Kreises $F_1 : 0,36 T$, d. h. also der Funke hat bereits etwas vor Erreichung des negativen Spannungsmaximums eingesetzt. Andere Aufnahmen unter den gleichen Versuchsbedingungen ergaben bald etwas größere, bald etwas kleinere Verzögerungen, was auf die Eigenschaften der verwendeten Funkenstrecke F_2

Fig. 16.



zurückzuführen ist, bei deren kleinem Abstand von etwa $0,05$ mm sich die geringsten Änderungen naturgemäß ziemlich stark bemerkbar machen. Infolgedessen gelang es nur selten, die Einsatzspannung von F_1 , also die Ladenspannung der Kapazitäten gerade so einzuregulieren, daß F_2 im negativen Spannungsmaximum einsetzt. Für unsere Betrachtungen über die Wirksamkeit der Machschen Schaltung genügt es aber auch vollkommen, daß durch

das in Fig. 15 wiedergegebene Oszillogramm ein anschaulicher Beweis für die Richtigkeit der oben entwickelten Anschauungen erbracht ist. Eine weitere Bestätigung bringt die in Fig. 16 dargestellte Aufnahme eines fliegenden Geschosses. Bei dieser wurde die Machsche Schaltung entsprechend Fig. 11 verwendet und die Funkenstrecke F_1 , deren Enden mit Kugeln versehen waren, in die Geschosßbahn gestellt, und zwar so, daß das Geschosß gerade frei zwischen den beiden Elektroden hindurchfliegen konnte. In diesem Augenblick setzt der Funke F_1 ein und löst dann den eigentlichen Beleuchtungsfunken F_2 , welcher das fliegende Geschosß photographiert, mit der durch die Versuchsanordnung gegebenen Zeitdifferenz aus. In der so erhaltenen Aufnahme (Fig. 16) erkennt man deutlich, daß zwischen dem Auslösen des Funkens in F_1 und dem Auftreten des Beleuchtungsfunkens F_2 eine Zeitdifferenz

besteht, da das Geschloß bereits die Ebene der Kugeln verlassen hat. Die Größe der Zeitdifferenz kann aus der bekannten Geschwindigkeit des Geschosses berechnet werden. Bei einem Versuche¹⁾ ergab sich z. B. eine Zeitdifferenz von $1,3 \cdot 10^{-5}$ Sek. Diese Zeitdifferenz wird nur dann der halben Schwingungsdauer des Kreises $C_2 L_2 F_1$ entsprechen, wenn die Funkenstrecke F_2 auf ihre maximale Schlagweite, also nahezu auf den doppelten Wert von F_1 eingestellt ist. Da man dies aber mit Rücksicht auf die unvermeidlichen Schwankungen in der Einsatzspannung einer Funkenstrecke nicht tun wird, um Fehltaufnahmen zu vermeiden, so wird man im allgemeinen stets Verzögerungen erhalten, welche unterhalb des rechnerischen Wertes $T/2$ liegen. Im Falle der oben erwähnten Meßaufnahme ergab die Rechnung für die maximal mögliche Verzögerung $T/2 = 1,6 \cdot 10^{-5}$ Sek. Jedenfalls sieht man, daß der experimentell gefundene Wert entsprechend den theoretischen Erfordernissen unterhalb des rechnerisch möglichen Maximalwertes liegt.

Bei der praktischen Ausführung der Machschen Schaltung ist nun noch eine Anzahl von Punkten zu beachten, welche sowohl für das Gelingen der Versuche von großer Bedeutung sind, als auch in theoretischer Hinsicht manches Interessante bieten.

Zunächst wollen wir uns mit dem Einfluß der Kapazität C_1 beschäftigen. Wenn die Zuleitungen zu der Funkenstrecke F_1 sehr kurz, also ohne merkliche Selbstinduktion sind, so ist das Einschalten der Kapazität C_1 für den im Kreise $C_2 L_2 F_1$ sich abspielenden Schwingungsvorgang bedeutungslos, oder auch anders ausgedrückt: wenn die Schwingungsdauern T_1 und T_2 der Kreise $C_1 F_1$, und $C_2 L_2 F_1$ genügend weit auseinander liegen, was praktisch stets der Fall sein wird. Bei der benutzten Schaltung ergaben sich z. B. für verschiedene Werte von C_1 die nachstehend angegebenen Schwingungsdauern T_2 für den Kreis $C_2 L_2 F_1$:

$$\begin{aligned} C_1 = 400\,000, T_2 = 3,218 \cdot 10^{-3} \text{ Sek.}, C_1 = 200\,000, \\ T_2 = 3,23 \cdot 10^{-3} \text{ Sek.}, C_1 = 0, T_2 = 3,224 \cdot 10^{-3} \text{ Sek.} \end{aligned}$$

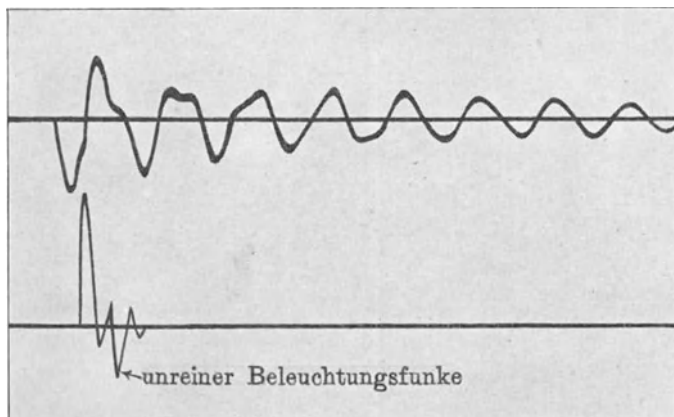
¹⁾ Diese Aufnahme ist nicht reproduziert, da bei ihr die Verzögerung etwas kleiner und die Einzelheiten nicht so gut sichtbar waren wie in Fig. 16. Für die Ausmessung war sie jedoch geeigneter, weil sie mit einer genau definierten eisenlosen Selbstinduktion hergestellt ist. Eine größere gleich gute Selbstinduktion stand nicht zur Verfügung und deswegen ist Fig. 16 unter Verwendung einer Spule mit Eisen aufgenommen.

Die Abweichungen liegen durchaus innerhalb der Fehlergrenzen. Gleichwohl aber hat die Kapazität C_1 in der Machschen Schaltung eine nicht unwesentliche Bedeutung. Wenn man nämlich, um größere Verzögerungen von z. B. 10 bis 20 cm für ein S-Geschoß zu erreichen, eine große Selbstinduktion L_2 wählt, so wird man im allgemeinen in der Funkenstrecke F_1 nur eine verhältnismäßig kleine Elektrizitätsmenge zur Entladung bringen können und infolgedessen wird auch die doch immerhin mindestens 10 mm betragende Funkenstrecke F_1 nur sehr schwach ionisiert werden. Die Folge davon wiederum ist, daß die oszillatorische Entladung des Kreises $C_2L_2F_1$ durch den großen Funkenwiderstand sehr stark gedämpft ist, so daß die an F_2 auftretende Funkenspannung nur wenig größer als die von F_1 wird, was natürlich wiederum eine Herabsetzung der Helligkeit des Beleuchtungsfunkens, die aus optischen Gründen nicht erwünscht ist, zur Folge hat. Hier macht sich nun der Einfluß der Kapazität C_1 in dem Sinne geltend, daß durch die Entladung der verhältnismäßig großen Kapazität C_1 die Funkenstrecke F_1 gut leitend gemacht wird. Dies lehrt auch schon der bloße Augenschein bei einem Versuch, wenn man nämlich die Entladung bei F_1 übergehen läßt, einmal mit C_1 und einmal ohne C_1 . In dem ersten Fall erhält man einen hellen knallenden Funken, im zweiten Fall eine schwache, mehr lichtbogenähnliche Entladung. Natürlich wäre es möglich, auch ohne Anwendung der Zusatzkapazität C_1 die Schwingungen im Kreise C_2L_2 schwächer gedämpft herzustellen, jedoch würde dies zu praktisch unbequemen Dimensionen der einzelnen Elemente führen. Mit Rücksicht darauf aber, daß doch der Hauptdämpfungswiderstand bei der Machschen Anordnung stets in der Auslösefunkenstrecke F_1 liegen wird, dürfte das Mittel, außer der Kapazität C_2 auch noch die Kapazität C_1 über die Funkenstrecke F_1 zu entladen, praktisch recht wertvoll sein. Allerdings ist, worauf bereits oben hingewiesen wurde, stets darauf zu achten, daß die Schwingungsdauern T_1 und T_2 genügend weit auseinander liegen, was man praktisch stets erreichen wird, wenn man die Zuleitungen von C_1 zur Funkenstrecke F_1 so kurz als möglich macht. Achtet man hierauf nicht und kommen T_1 und T_2 einander nahe, so bilden sich in der Funkenstrecke F_1 Schwebungen bzw. Interferenzschwingungen aus, welche, wie das Oszillogramm der Fig. 17 zeigt, in der Funkenstrecke F_2 eine

unreine Entladung hervorrufen, so daß man nicht mehr einen einzigen kurzen Beleuchtungsfunken erhält, sondern eine länger andauernde Entladung, welche dann notwendigerweise unscharfe Photographien zur Folge hat.

Endlich ist noch ein rein praktischer Vorteil zu erwähnen, den man durch Einschaltung der großen Kapazität C_1 erhält, wenn man zum Aufladen der Kapazitäten eine Influenzmaschine benutzt. Eine solche gibt im allgemeinen Maximalspannungen, welche erheblich größer sind als die an der Funkenstrecke F_1 eingestellte Überschlagsspannung. Benutzt man nun Influenzmaschinen mittlerer Leistung, z. B. Starkstrommaschinen, so würden

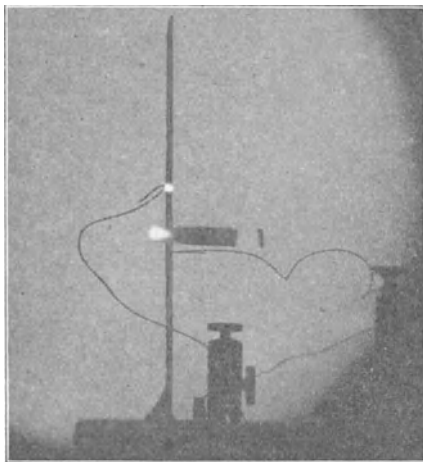
Fig. 17.



die verhältnismäßig kleinen Kapazitäten C_2 und C_3 sehr schnell aufgeladen und dann die Funkenstrecke F_1 bereits durchschlagen werden, bevor der Schuß fällt. Dieses Durchschlagen von F_1 hat aber auch die Auslösung des Beleuchtungsfunkens bei F_2 zur Folge, wodurch die in dem Aufnahmeapparat befindliche photographische Platte vorzeitig belichtet und damit für die eigentliche Aufnahme unbrauchbar gemacht wird. Man kann nun allerdings die Maschine, um ihre Spannung herabzusetzen, sehr langsam laufen lassen, jedoch kommt man hier praktisch sehr bald an eine untere Grenze, so daß man häufig keine genügende Sicherheit gegen vorzeitiges Durchschlagen der Funkenstrecke F_1 erreichen kann. Hier wirkt die Einschaltung der Kapazität C_1 in dem Sinne, daß die zur Erreichung der Durchschlagsspannung an F_1

notwendige Zeit stark vergrößert wird, so daß je nach der Maschinenart eine Aufladezeit von einer oder mehreren Minuten, die sich durch vorheriges Ausprobieren leicht feststellen läßt, erforderlich ist, bevor von selbst der Durchschlag bei F_1 erfolgt. Innerhalb dieser Zeit kann man ohne Schwierigkeit den Augenblick für das Abfeuern des Schusses so wählen, daß der Funke in F_1 gerade

Fig. 18.



beim Durchfliegen des Geschosses ausgelöst wird.

Ein weiterer wichtiger Punkt in der Machschen Schaltung bei ihrer Anwendung auf ballistischem Gebiete ist die Wahl einer geeigneten Auslösevorrichtung. Diese muß so beschaffen sein, daß sie das Auftreten von Oszillationen im Kreise $C_2 L_2 F_1$ ermöglicht, da man nur in diesem Falle bei geeigneter Einstellung der Funkenlänge von F_1 eine genau definierte Verzögerung erhält. Von den verschiede-

nen Auslösevorrichtungen, welche im ersten Kapitel beschrieben sind, wurden nun bei den Versuchen benutzt:

1. die Methode des freien Hindurchschießens zwischen zwei Kugeln,
2. die Glashütchenauslösung und
3. das Durchschießen einer auf beiden Seiten mit Stanniol beklebten Glasplatte.

Es zeigte sich dabei folgendes: Die Methode 1 ergab stets dieselben Resultate und die Größe der Verzögerung schwankte nur innerhalb sehr enger Grenzen. Die Methoden 2 und 3 dagegen ergaben erheblich von der Methode 1 abweichende Resultate, und zwar waren die Verzögerungen beträchtlich kleiner. Fig. 18 zeigt eine Aufnahme des fliegenden Geschosses unter den gleichen Versuchsbedingungen wie bei Fig. 16, nur daß als Auslösefunkenstrecke nicht die Kugeln, sondern eine beiderseits mit Stanniol beklebte Glasplatte benutzt wurde. Bei oberflächlicher Betrachtung scheint

die Verzögerung auf Null herabgegangen zu sein. Eine genauere Ausmessung der Lage des Geschosses mit Hilfe der in einzelnen Photographien ebenfalls sichtbaren Kopfwellen zeigte aber, daß doch noch eine, wenn auch geringe Verzögerung vorhanden ist. Wiederholte Vergleichsversuche unter denselben Bedingungen ergaben stets das gleiche Resultat, und ähnlich war auch das Ergebnis bei Verwendung der Glashütchenauslösung.

Ferner wurde eine starke Herabsetzung der Verzögerung auch bisweilen beobachtet, wenn zwischen Metalldrähten hindurchgeschossen und durch Zufall einer der Drähte vom Geschoß getroffen wurde. Diese Erscheinung dürfte im Zusammenhang mit einer bald größeren, bald kleineren Löschwirkung der Funkenstrecke F_1 stehen. Insbesondere beim Durschschießen der beiderseits mit Stanniol beklebten Glasplatte wird, wie ich glaube, die Funkenstrecke durch die bei Zersplitterung des Glases entstehenden zahllosen kleinen Glasteilchen ausgefüllt und dadurch eine außerordentlich schnelle Entionisierung herbeigeführt. Da nun die Entionisierungszeit einer gewöhnlichen Luftfunkenstrecke, wie ich früher festgestellt habe¹⁾, etwa $47 \cdot 10^{-6}$ Sek., die einer Löschfunkenstrecke mittlerer Löschwirkung etwa $5,13 \cdot 10^{-6}$ Sek. beträgt, während andererseits die halbe Schwingungsdauer der Oszillationen im Kreise $C_2 L_2 F_1$ bei der oben erzielten Verzögerung den Wert von $1,6 \cdot 10^{-5}$ Sek. besitzt, so sieht man, daß schon bei verhältnismäßig geringer Löschwirkung leicht ein vorzeitiges Abreißen der Oszillationen im Kreise $C_2 L_2 F_1$, wie es in Fig. 18 der Fall ist, eintreten kann. Infolgedessen wird auch der Beleuchtungsfunke in F_2 mit entsprechend geringerer Verzögerung einsetzen. Allerdings ist in diesem Falle die an F_2 auftretende Spannung geringer, wenn man nicht die Influenzmaschine schneller laufen läßt, also die Durchschlagsspannung an F_1 erhöht, was bei Verwendung der beklebten Glasplatte ohne weiteres möglich ist, da man hier ein vorzeitiges Überschlagen von F_1 nicht zu befürchten hat. In gewissem Sinne konnte eine Prüfung auf die Richtigkeit

¹⁾ Br. Glatzel, Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Teleph. 2, 65 (1909). Im Zusammenhang hiermit dürften auch Beobachtungen stehen, welche ich gelegentlich von Untersuchungen an Gleitfunken, die sich zwischen Stanniol- oder Flüssigkeitsteilchen auf Glas ausbildeten, gemacht habe. Derartige Funken zeigten nämlich eine außerordentlich starke Löschwirkung, wie sie sonst nur bei idealer Stoßerregung beobachtet wird.

der vorstehend entwickelten Anschauung vorgenommen werden dadurch, daß die Änderung der Verzögerung bei einer Luft-Auslösefunkenstrecke gegenüber einer Glasplatten-Auslösefunkenstrecke bei verschiedenen großen Selbstinduktionen L_2 festgestellt wurde. Aus der Hochfrequenztechnik ist nämlich bekannt, daß bei gleicher Kapazität die Löschwirkung einer Funkenstrecke um so unwirksamer wird, je größer die Selbstinduktion in dem oszillierenden Kreise ist ($\delta = \frac{w}{2L}$; nur bei sehr kleinen Selbstinduktionen erhält man die sogenannte aperiodische Stoßerregung). Es wurden daher die Verzögerungen bei verschiedener Auslösung und bei zwei Werten von L_2 bestimmt, welche sehr stark voneinander verschieden waren. Die eine Spule war die Sekundärwicklung eines kleinen Induktors, die andere die bereits oben erwähnte eisenlose Spule. Bei der großen Selbstinduktion war keine merkbare Differenz vorhanden, wenn man einmal mit der Luftfunkenstreckenauslösung und dann mit der Glasplattenauslösung schoß. Dagegen trat bei der kleinen Selbstinduktion die bereits oben besprochene große Differenz auf.

Aus diesen Versuchen folgt also, daß man bei der Wahl der Auslösevorrichtung für die Machsche Schaltung sehr vorsichtig sein muß. Am besten bewährt sich stets auch die in den Aufnahmen der Fig. 18 angewendete Auslösung, bei welcher das Geschoß zwischen den beiden kugelförmigen Elektroden der Auslösefunkenstrecke F_1 frei hindurchfliegt. In diesem Falle erhält man auch bei kleineren Selbstinduktionen L_2 reine Oszillationen im Kreise $C_2 L_2 F_1$ und damit bei geeigneter Einstellung von F_2 die aus den Kreiskonstanten berechenbare Verzögerung zwischen F_1 und F_2 . Nebenbei mag noch bemerkt werden, daß die Änderungen in der Verzögerung, welche nach der oben entwickelten Anschauung durch die größere oder geringere Löschfähigkeit der Funkenstrecke hervorgerufen werden, vielleicht eine Möglichkeit bieten, die für die Hochfrequenztechnik so wichtige Frage der Löschwirkung von Funkenstrecken durch direkte Zeitmessung zu lösen, im Gegensatz zu den bisher in der Hochfrequenztechnik verwandten indirekten Methoden, insbesondere, wenn man bedenkt, daß 1 mm Geschoßweg angenähert 10^{-6} Sek. entspricht, also einer Zeit, welche der Größenordnung nach mit den oben angegebenen Zahlen für die Löszeit von Funkenstrecken zusammenfällt.

Wir wollen nun weiter dazu übergehen, den Einfluß der Kapazitäten C_2 und C_3 in der Machschen Schaltung zu studieren. Die Kapazität C_2 kann beliebig gewählt werden so, daß man im Kreise $C_2 L_2 F_1$ die gewünschte Schwingungsdauer erhält. Zweckmäßig wird man jedoch C_2 nicht zu groß gegenüber L_2 wählen, damit die entstehenden Oszillationen nicht zu stark gedämpft werden. Dagegen ist die richtige Wahl von C_3 von großer Bedeutung, wenn man scharfe Geschoßaufnahmen erzielen will. Die Schärfe dieser Aufnahmen hängt lediglich von der Dauer des Beleuchtungsfunkens F_2 ab. Je geringer diese ist, um so schärfer werden die Bilder. Bei Abbildung des Geschosses in wahrer Größe würde bereits, wenn man die Geschosßgeschwindigkeit mit rund 1000 m/Sek. in Rechnung setzt, ein Beleuchtungsfunke, welcher 10^{-7} Sek. andauert, eine Unschärfe entsprechend $\frac{1}{10}$ mm Geschosßbewegung während der Aufnahme ergeben. Man sieht also, daß an die Kürze der Momentbelichtung recht hohe Anforderungen gestellt werden. Die Zeitdauer des Funkens in F_2 ist nun im wesentlichen von drei Größen abhängig: 1. von der Schwingungsdauer im Kreise $C_2 C_3 F_2$, 2. von der Dämpfung des Kreises, und 3. von der Löschwirkung der Funkenstrecke selbst. Je kürzer die Wellenlänge der Schwingungen ist, um so schneller wird bei sonst gleichen Verlusten im Kreise der Beleuchtungsfunke in F_2 erlöschen. Für die praktische Ausführung ergeben sich hieraus zwei Forderungen: 1. die Zuleitungen zur Funkenstrecke, d. h. also die Selbstinduktion des Kreises, 2. die Kapazität C_3 so klein als möglich zu machen. Der Erfüllung der ersten Bedingung werden lediglich durch die räumliche Anordnung¹⁾ Grenzen gezogen sein, während bei zu kleiner Kapazität C_3 die Helligkeit des Beleuchtungsfunkens eine zu geringe wird. Bei Anwendung lichtstarker Spiegel und Objektive erhält man mit Kapazitäten von etwa 1000 bis 1500 cm Größe noch gute Bilder. Häufig genügen aber diese beiden Mittel allein noch nicht. Es ist auch erforderlich, die Dämpfung des Kreises möglichst groß zu machen, um ein schnelles Abklingen der Schwingungen zu erzielen. Da nun in unserem Falle die Dämpfung der Funkenstrecke gleichsam Nutzdämpfung ist, weil

1) Es darf jedoch hierbei nicht vergessen werden, daß auch die Leidener Flaschen durch die räumliche Ausdehnung ihrer Belegungen eine gewisse Selbstinduktion besitzen, welche sich stets noch zu derjenigen der Zuleitungen addiert.

ja die Helligkeit des Beleuchtungsfunkens um so größer wird, je mehr Energie man in der Funkenstrecke selbst vernichtet, so ergibt sich hieraus, daß wir die Funkenstrecke so lang als möglich, mindestens 10 bis 12 mm machen werden, was sich durch geeignete Einstellung der Auslösefunkenstrecke F_1 stets erreichen läßt. Zahlreiche Vergleichsaufnahmen unter den verschiedenen Versuchsbedingungen, welche im Laufe der Jahre in dem ballistischen Laboratorium der Militärtechnischen Akademie zu Charlottenburg hergestellt worden sind, haben die Richtigkeit der oben angegebenen Gesichtspunkte für die Dimensionierung des Schwingungskreises, welcher die Beleuchtungsfunkenstrecke F_2 enthält, bestätigt. Diese Gesichtspunkte gelten übrigens stets auch unabhängig von der Machschen Schaltung, sobald es sich um die Erzeugung von Beleuchtungsfunken für ballistische Momentaufnahmen handelt. Eine kurze Bemerkung mag im Zusammenhang hiermit der Vollständigkeit halber noch über den Einfluß der Kapazität C_2 , welche ja auch in dem Schwingungskreis der Beleuchtungsfunkenstrecke liegt, gemacht werden. Wir hatten oben gesehen, daß C_2 gegenüber C_3 verhältnismäßig groß (z. B. viermal größer) gemacht wird. Für den Schwingungskreis der Beleuchtungsfunkenstrecke ist dies unschädlich, da ja hier die beiden Kapazitäten C_2 und C_3 beim Einsetzen des Schwingungsvorganges hintereinandergeschaltet sind und infolgedessen nur die kleinere Kapazität C_3 die bestimmende ist. Wenn nun, was ja in Ausnahmefällen vorkommen kann, die oben angegebenen Mittel zur Herabsetzung der Funkendauer in F_2 noch nicht genügen sollten, was insbesondere dann der Fall sein wird, wenn man, um große Helligkeiten zu erzielen, C_3 verhältnismäßig groß wählen muß, so bietet sich noch die Möglichkeit, ein schnelles Verlöschen der Schwingungen im Kreise der Beleuchtungsfunkenstrecke dadurch herbeizuführen, daß man in die Zuleitungen entweder noch besondere Löschfunkenstrecken oder aber besser Löschröhren, wie sie für Zwecke der Hochfrequenztechnik von M. Wien¹⁾ angegeben worden sind, einschaltet. Löschfunkenstrecken werden hierbei im allgemeinen nur dann wirksam sein, wenn sie ideale Löschwirkung besitzen, also z. B. die von Scheller angegebene Spiritusfunkenstrecke, während

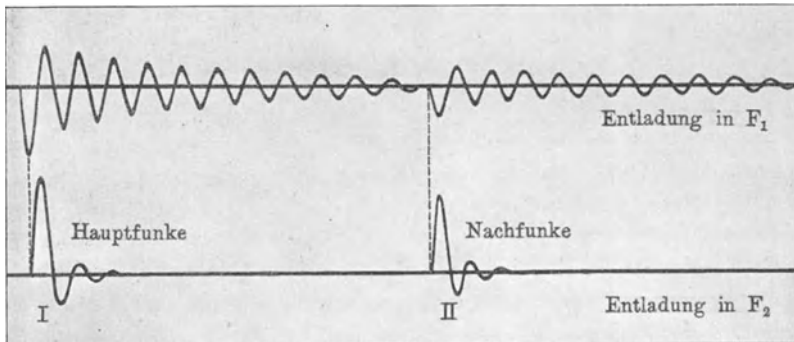
¹⁾ M. Wien, Phys. ZS. **11**, 76 (1910); Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Telephonie **4**, 135 (1910).

die Löschfähigkeit gewöhnlicher Löschfunkenstrecken, wie sie in Hochfrequenzkreisen, welche nach dem Prinzip der Schwebungsstoßerregung arbeiten, Verwendung finden, nicht ausreicht. Die besten Resultate wird man aber wohl stets mit gut gebauten Löschröhren nach Wien erhalten, da diese eine nahezu ideale Löschfähigkeit und gegenüber der Spiritusfunkenstrecke den Vorzug einer sehr einfachen Anordnung und guter Betriebsfähigkeit besitzen. Die Einschaltung von Wasserwiderständen in die Zuleitungen zu der Beleuchtungsfunkenstrecke F_2 zum Zwecke der Dämpfungserhöhung, an die man ja auch denken könnte, ist deswegen falsch, weil hierdurch eine Energievernichtung an falscher Stelle, eine nicht nutzbringende Dämpfung hervorgerufen wird.

Endlich mag noch eine kleine Abänderung der Machschen Schaltung besprochen werden, welche unter Umständen von Vorteil sein kann. Man kann nämlich daran denken, den in Fig. 11 gezeichneten Wasserwiderstand W durch einen Schalter zu ersetzen. Dieser Schalter bleibt während der Aufladung der Kapazitäten C_1 , C_2 , C_3 geschlossen und wird erst kurz vor dem Abfeuern des Schusses geöffnet. Man erreicht in diesem Falle größere Funkenlängen in F_2 , was nach den früheren Ausführungen von Vorteil ist, weil ja jetzt der parallel zu F_2 liegende Wasserwiderstand fortfällt, welcher immerhin eine gewisse Energiemenge verzehrt, um so mehr, als er kurz vor dem Einsetzen des Funkens an nahezu der doppelten Spannung liegt. Allerdings ist es in diesem Falle erforderlich, vor Inbetriebsetzung der Schaltung die aufladende Stromquelle, also hier die Influenzmaschine, abzuschalten. Tut man dies nicht, so erhält man in F_2 nach kürzerer oder längerer Zeit noch einen oder mehrere Nachfunken, welche die vorher gemachte Aufnahme zerstören. Die Ursache hierfür ist folgende: Wenn der an Stelle des Wasserwiderstandes befindliche Schalter geöffnet bleibt — wenn er schnell genug nach dem Schuß wieder geschlossen werden kann, ist die Gefahr des Auftretens von Nachfunken nicht vorhanden — und die Maschine ladet nun die durch den ersten Beleuchtungsfunken entladenen Kapazitäten wieder auf, so wird die Kapazität C_3 , welche ja sehr klein ist, schnell von der Maschine aufgeladen, während die Kapazität C_2 , zu welcher noch die große Kapazität C_1 parallel geschaltet ist, außerordentlich langsam geladen werden, da sie nur einpolig an der Maschine liegen und infolgedessen die Elektrizität vom zweiten Pol der

Maschine nur durch etwaige Isolationsfehler im Schalter oder der Funkenstrecke F_2 nach den inneren Belegungen der Flaschen C_1 und C_2 strömen kann. Denkt man sich den einen Pol der Maschine, z. B. die äußeren Belegungen der Kapazitäten C_1 , C_2 , C_3 geerdet, so wird, wenn C_3 bereits voll aufgeladen ist, an der inneren Belegung von C_2 , also im Punkt P_2 , noch nahezu das Potential Null herrschen. Die Folge davon ist, daß wir beim Weiterarbeiten der Lademaschine bereits nach kurzer Zeit zwischen den Punkten P_2 und P_3 die volle Maschinenspannung haben, welche im allgemeinen erheblich größer als die Einsatzspannung von F_2 sein wird, und es entsteht dann ein Nachfunke. Daß

Fig. 19.



dieser Funke im Gegensatz zu dem ersten, in F_2 hervorgerufenen Beleuchtungsfunke gänzlich unabhängig von den im Kreise $C_2L_2F_1$ vorhandenen Oszillationen ist, konnte ich in der oben erwähnten Schaltung mit Hilfe des Oszillographen ebenfalls nachweisen. Die Fig. 19, welche diese Aufnahme, bei welcher also im Gegensatz zu den früheren der Fig. 15 die Netzzuleitungen nicht abgeschaltet wurden ¹⁾, wiedergibt, zeigt dies deutlich. Der erste Beleuchtungsfunke *I* setzt etwas nach Erreichung des negativen Strommaximums der im Kreise $C_2L_2F_1$ entstehenden Oszillationen ein, während der Nachfunke *II* auftritt, wenn überhaupt keine Oszillationen in dem mittleren Schwingungskreise vorhanden sind. Diese setzen erst ein, nachdem die Kapazität C_2 beim Übergang des Nachfunkens eine, wenn auch geringe Neu-

¹⁾ Die Auslösefunkenstrecke F_1 war, wie bereits früher angegeben, durch einen Schalter ersetzt, welcher geschlossen blieb.

aufladung erfahren hat; daher auch die geringe Amplitude der Oszillationen.

Ich möchte nun noch mit einigen Worten auf eine andere Abänderung der Machschen Schaltung eingehen, obwohl sie, wenigstens für Zwecke der Ballistik, durchaus unzweckmäßig ist. Ersetzt man die Selbstinduktion L_2 durch einen Wasserwiderstand, macht man also die Entladung im Kreise C_2 —Wasserwiderstand— F_1 aperiodisch, so erhält man auch ein verzögertes Einsetzen der Funkenstrecke F_2 gegenüber F_1 , jedoch muß in diesem Falle F_2 kleiner als F_1 gemacht werden, da ja, wie ohne weiteres ersichtlich ist, bei dieser Schaltung an F_2 im Idealfall nur die gleiche Spannung auftreten kann wie an F_1 , während beim Vorhandensein von Oszillationen eine Verdoppelung der Spannung erfolgt. Abgesehen von diesem Mangel, daß man gezwungen ist, kürzere Funkenstrecken für F_2 zu verwenden, ist die Anordnung aber auch hinsichtlich der Erreichung einer bestimmten Verzögerung praktisch recht unzuverlässig. Betrachten wir zunächst noch einmal die oszillatorische Entladung und nehmen wir an, daß hierbei die Funkenstrecke F_2 auf nahezu den doppelten Wert der Funkenstrecke von F_1 eingestellt ist, so wird das Einsetzen von F_2 ziemlich genau im ersten negativen Spannungsmaximum des Oszillationsvorganges erfolgen. Kleinere Schwankungen in der Einsatzspannung werden bei dem durch die Oszillationen festgelegten Spannungsverlauf nur geringe Abweichungen der Verzögerung von dem Werte $T/2$ zur Folge haben. Ganz anders liegen aber die Verhältnisse bei der aperiodischen Entladung. Reguliert man hier die Funkenstrecke auf eine bestimmte Einsatzspannung ein, welche etwas unterhalb derjenigen von F_1 liegt, so werden infolge der langsamen zeitlichen Änderung der Spannung geringe Änderungen in der Einsatzspannung von F_1 bereits große Änderungen in der Verzögerung zur Folge haben. Die Entladung wird bald früher, bald später einsetzen. Mit Rücksicht auf diese Unsicherheit wird sich also die Anwendung dieser Anordnung wohl stets verbieten.

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Machschen Schaltung, welche wir bisher noch nicht in den Bereich unserer Betrachtungen gezogen haben, erhalten wir nun noch, wenn wir die Beleuchtungsfunkenstrecke F_2 nicht auf die zwischen den Punkten P_2 und P_3 maximal auftretende Spannungsdifferenz einstellen,

sondern auf kleinere Werte. Bei Einstellung auf das Maximum ergibt sich, wie oben eingehend auseinandergesetzt wurde, theoretisch eine Verzögerung von $T/2$. Machen wir nun die Funkenstrecke kürzer, so wird, wie auch ohne weiteres klar ist, das Einsetzen des Beleuchtungsfunkens früher erfolgen, die Verzögerung also geringer werden. Hieraus ergibt sich zunächst, daß die Verzögerung nicht nur von den Konstanten des Kreises $C_2 L_2 F_1$, sondern auch von der Länge der Funkenstrecke F_2 abhängig ist. Wählen wir aber F_2 erheblich kleiner als die an F_1 herrschende Spannung, so beobachten wir nicht nur ein noch weiteres Sinken der Verzögerung, sondern es tritt nach dem ersten Beleuchtungsfunken noch eine Anzahl anderer auf. Die schematische Fig. 20 mag dies näher erläutern. Die Sinuskurve stellt wiederum den

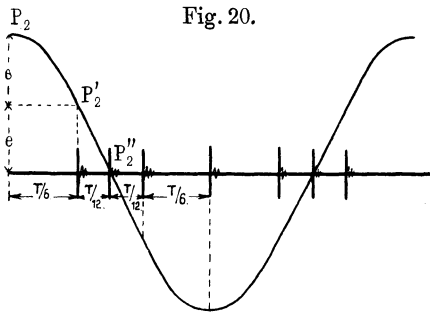


Fig. 20.

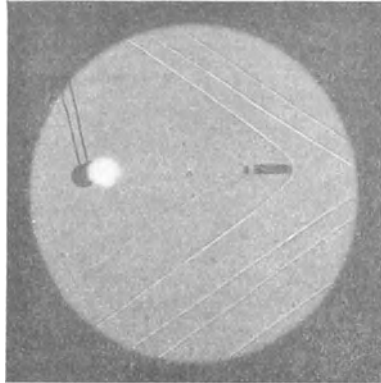
Spannungsverlauf an der inneren Belegung von C_2 , d. h. also im Punkte P_2 dar. Kurz bevor die Auslösung des Funkens F_1 erfolgt, haben wir im Punkt P_3 die gleiche Spannung wie in P_2 . P_2 und P_3 liegen auf derselben Parallelen zur Abszissenachse. Die Einsatzspannung der Beleuchtungsfunken-

strecke möge nun e sein, dann wird, wenn die Auslösung in F_1 vor sich gegangen ist, nach einiger Zeit die Spannung im Punkt P_2 auf den Betrag P_2' gesunken sein. Ist nun die zwischen P_3 , das ja zunächst seine ursprüngliche Spannung beibehält, und P_2' entstandene Spannungsdifferenz gleich e , so wird jetzt der erste Beleuchtungsfunken einsetzen. Die Kapazität C_3 entladet sich hierbei so weit, daß nunmehr auch in P_3 die geringere Spannung P_3' gleich P_2' vorhanden ist. Nach einiger Zeit ist dann P_2' wiederum gesunken auf P_2'' und man erhält, wenn $P_3' - P_2'' = e$ geworden ist, den zweiten Beleuchtungsfunken. In gleicher Weise wiederholt sich der Vorgang während der ganzen Dauer der Oszillationen im Kreise $C_2 L_2 F_1$, bis schließlich die Amplitude der Schwingung so klein geworden ist, daß die Spannungsdifferenz e nicht mehr erreicht werden kann. Je kleiner man die Einsatzspannung e , also die Funkenlänge von F_2 , macht, um so mehr Funken erhält

man pro Periode. Während wir also bei Einstellung von F_2 auf die Maximalspannung nur einen einzigen Beleuchtungsfunken erhalten, treten bei kleineren Funkenlängen F_2 mehr oder weniger Partialfunken auf. Die zeitlichen Abstände, in denen die einzelnen Partialfunken aufeinander folgen, sind jedoch nicht gleich, wie sowohl die Betrachtung der Fig. 20 als auch eine einfache Rechnung lehrt. Dies hat seinen Grund darin, daß bei einer Sinuskurve gleiche Änderungen der Ordinate nicht gleichen Änderungen der Abszisse entsprechen. Nehmen wir z. B. an, daß e gleich dem vierten Teil der Maximalspannung zwischen den Punkten P_2 und P_3 ist, so ergibt die Rechnung für die Abstände, in denen die einzelnen Beleuchtungsfunken (Partialfunken) aufeinander folgen, die Werte $\frac{T}{6}$, $\frac{T}{12}$, $\frac{T}{12}$, $\frac{T}{6}$. Wenn man also

daran denken wollte, diese Anordnung¹⁾ für Zwecke der Funkenkinematographie (vgl. Kap. IV) zu verwenden, so müßte man den immerhin recht unangenehmen Mangel mit in Kauf nehmen, daß die einzelnen Beleuchtungsfunken in sehr ungleichen Abständen aufeinander folgen, die Teilbilder also verschieden weit auseinander liegen. Wir werden später sehen, daß es Methoden gibt, welche diesen Mangel in geringerem Grade besitzen, so daß wir auf die Verwendung der Machschen Schaltung für diesen Zweck verzichten können²⁾. Immerhin ist aber das Auftreten mehrerer Funken für die Erklärung der Wirkungsweise der Machschen Schaltung von Wichtigkeit, und deswegen mag in Fig. 21 noch eine Schußaufnahme mitgeteilt werden, bei welcher die Funkenstrecke F_2 auf einen kleineren Wert eingestellt war. Man sieht hier, besonders an den

Fig. 21.



¹⁾ In diesem Zusammenhange sei auch auf die ersten von Feddersen herrührenden Aufnahmen von Funkenoszillationen hingewiesen.

²⁾ Bei Anwendung der aperiodischen Entladung läßt sich dieser Mangel meist beseitigen, vgl. die Methode für Vielfachfunkenphotographie von Schatte (Kap. IV).

verschiedenen Kopf- und Schwanzwellen, welche im Gesichtsfelde vorhanden sind, daß das fliegende Geschoß in mehreren aufeinander folgenden Stellungen photographiert worden ist. Wollte man, was natürlich im Interesse der Schärfe der einzelnen Bilder zweckmäßiger wäre, die Übereinanderlagerung der Teilbilder wie in Fig. 21 vermeiden, so müßte man, wie es in der Mehrfachfunkenphotographie geschieht, an Stelle einer ruhenden photographischen Platte einen rotierenden Film verwenden. Für den vorliegenden Zweck war dies jedoch nicht nötig, da auch auf der ruhenden Platte deutlich das Vorhandensein einer größeren Anzahl von Funken zu erkennen ist.

Die vorstehenden Darlegungen über die Wirkungsweise der Machschen Schaltung sind absichtlich so ausführlich gestaltet worden, einmal um die vielen Schwierigkeiten aufzuklären, welche bei ihrer praktischen Ausführung auftreten, dann aber auch, um zu zeigen, daß diese Schaltung gerade unter Benutzung unserer modernen Kenntnisse auf dem Gebiete der Hochfrequenztechnik vieles Interessante bietet und vielleicht auch mit Vorteil für die Untersuchung anderer physikalischer Probleme als nur derjenigen aus dem Gebiete der Ballistik Verwendung finden kann.

b) Die Töplersche Methode

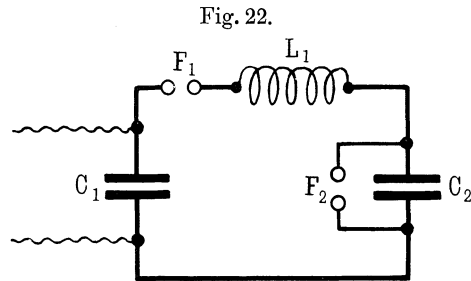
zur Herstellung kleiner Zeitdifferenzen zwischen zwei Funken.

In seinen grundlegenden Arbeiten über die Schlierenmethode¹⁾ hat Töpler ebenso wie Mach auch einige Beobachtungen über Knallwellen angestellt, die von einem elektrischen Funken ausgehen. Auch er brauchte, um diese Knallwellen in den verschiedenen Entwicklungsstadien beobachten zu können, für seinen Schlierenapparat eine Beleuchtungsfunkenstrecke, welche mit einer je nach Wunsch einstellbaren Zeitdifferenz gegenüber dem Knallfunken aufleuchtete. Die von ihm hierfür verwendete Schaltung ist in ihrer prinzipiellen Anordnung in Fig. 22 dargestellt.

Allerdings hat Töpler mit Rücksicht auf den damaligen Stand der wissenschaftlichen Forschung den bei dieser Schaltung sich abspielenden elektrischen Vorgang keineswegs richtig deuten können; immerhin zeugt es aber von seiner vorzüglichen Beobachtungsgabe und seiner großen experimentellen Geschicklichkeit,

¹⁾ A. Töpler, Pogg. Ann. **127**, 556 (1866); Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 158.

daß er, auch ohne die Theorie der Schaltung zu kennen, die für seinen Zweck, nämlich die Erzielung einer bestimmten Verzögerung maßgebenden Versuchsbedingungen durchaus richtig aufgefunden und angegeben hat. Wenn er gleichwohl, wie er in seinen Abhandlungen ausführlich darlegt, mit der Methode nur unter großen Schwierigkeiten arbeiten konnte, weil es ihm nämlich nicht gelang, konstante Verzögerungen herzustellen, so lag dies weniger an dem Prinzip (der Methode, als an den damaligen geringen Kenntnissen auf dem Gebiete der Schwingungserzeugung in Kreisen, welche Kapazitäten, Selbstinduktionen und Funkenstrecken enthalten, und den dadurch hervorgerufenen Fehlern. Verwertet man jedoch für die Methode unsere jetzigen Erfahrungen in der Hochfrequenztechnik, so kann man ohne große Schwierigkeiten den von Töpler gerügten Mangel beseitigen und eine recht gute Konstanz der einmal eingestellten Zeitdifferenzen erreichen.



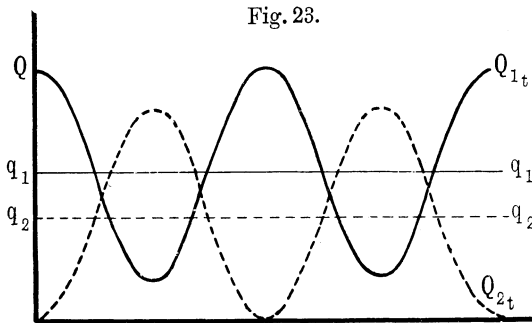
F_1 Knallfunken, F_2 Beleuchtungsfunken.

Wir wollen nun zunächst an Hand einer kurzen Rechnung und einer oszillographischen Aufnahme die in der Schaltung sich abspielenden Vorgänge behandeln. Aus den Ergebnissen können wir dann die verschiedenen Eigentümlichkeiten der Anordnung ableiten und die jeweils günstigsten Versuchsbedingungen für die praktische Ausführung festlegen.

Der Kondensator C_1 werde von einer Hochspannungsquelle, z. B. einer Influenzmaschine, aufgeladen. Ist die Spannung genügend hoch gestiegen, so entladet sich C_1 über die Funkenstrecke F_1 ¹⁾, die Selbstinduktion L_1 und den Kondensator C_2 .

¹⁾ Man kann sich hier die Frage vorlegen, welche Spannungsdifferenz an der Funkenstrecke F_1 liegt und ob überhaupt ein Einsetzen des Funkens möglich ist, da ja der Kondensator C_2 gleichsam eine Unterbrechung der Strombahn bedeutet. Beachtet man aber, daß nach beendeter Aufladung von C_1 ein statischer Zustand sich ausbildet, bei welchem die mit C_1 verbundene Belegung von C_2 z. B. das volle $+$ -Potential besitzt und die andere Belegung infolge der Influenzwirkung das volle $-$ -Potential, so sieht man, daß an F_1 dieselbe Spannung herrscht, wie an den Belegungen des Kondensators C_1 , vorausgesetzt natürlich, daß C_2 nicht unendlich klein ist.

Hierdurch wird C_2 geladen. Sowohl diese Ladung von C_2 wie auch die Entladung von C_1 erfolgt im allgemeinen in oszillatorischer Form, wobei die Amplitude beider Schwingungen allmählich abnimmt, bis endlich der statische Zustand erreicht ist, bei welchem die ursprünglich auf C_1 vorhandene Gesamtladung Q sich in die auf C_1 befindliche Ladung q_1 und in die auf C_2 befindliche Ladung q_2 geteilt hat. Das Verhältnis der Ladung q_1 und q_2 wird dabei durch dasjenige der Kapazitäten C_1 und C_2 bestimmt, da nach Erreichung des stationären Zustandes die



Spannung an beiden Kapazitäten gleich ist. Während des Entladungs- bzw. Ladungsvorganges pendelt also die jeweilige Ladung Q_1 von C_1 um den Endwert q_1 , und die jeweilige Ladung Q_2 von C_2 um den Endwert q_2 hin und her, und zwar in der Weise, daß stets die Summe

$$q_1 + q_2 = Q$$

ist. Gleichzeitig muß, wenn die Ladung auf C_1 ein Minimum ist, diejenige auf C_2 ein Maximum sein und umgekehrt, so daß also zwischen den beiden Ladungen auf C_1 und C_2 ein Phasenunterschied von π oder 180° besteht. Fig. 23 stellt zunächst schematisch diesen Vorgang für den Fall dar, daß keine Dämpfung im Schwingungskreise vorhanden ist.

Bezüglich der Spannungen E_{c_1} und E_{c_2} , welche nach Erreichung des stationären Zustandes auf den Kondensatoren C_1 und C_2 vorhanden sind, ist folgendes zu beachten. E_{c_1} muß gleich E_{c_2} , aber stets kleiner als diejenige Spannung E sein, bis zu welcher C_1 im Anfang aufgeladen wurde und mit der die Entladung in der Funkenstrecke F_1 eingesetzt hat. Ist C_1 sehr groß gegenüber C_2 , so wird die Endspannung $E_{c_1} = E_{c_2}$ nur wenig

kleiner als E sein. Je größer C_2 aber ist, um so niedriger wird die Spannung E_{c_1} verglichen mit E . Um diese stationären Werte E_{c_1} und E_{c_2} oszilliert während des Entladungs- bzw. Ladungsvorganges die jeweils an den Kondensatoren C_1 und C_2 vorhandene Spannung, und zwar ebenso, wie dies für die Ladungen der Fall ist. Eine Verdoppelung der Einsatzspannung E an der Funkenstrecke F_2 , wie sie bei der Machschen Methode vorhanden ist, kann also hier nur in dem theoretischen Falle $C_2 = 0$, welcher praktisch natürlich nicht möglich ist, eintreten, auch wenn man zunächst von dem Einfluß der Dämpfung absieht. Hat C_2 einen von Null verschiedenen Wert, so können wir nur eine Verdoppelung der Endspannung E_{c_2} erhalten.

Nach diesen allgemeinen Bemerkungen über die Art des sich abspielenden physikalischen Vorganges wollen wir dazu übergehen, die Erscheinungen im einzelnen an Hand der Rechnung zu verfolgen. Voraussetzen wollen wir, daß sowohl Ladung wie auch Entladung nach einer gedämpften Sinusschwingung verlaufen. Wir wollen ferner annehmen, daß die Ladung q_1 eine Phasenverschiebung φ_1 , und q_2 eine Phasenverschiebung φ_2 gegenüber der im Einsatzmomente des Funkens F_1 , $t = 0$, beginnenden Schwingung besitzen. Man erhält dann für die Momentanwerte der Ladungen Q_{1t} und Q_{2t} folgende allgemeine Gleichungen:

$$Q_{1t} = q_1 + a e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_1) \dots \dots \dots 1)$$

$$Q_{2t} = q_2 + b e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_2) \dots \dots \dots 2)$$

in denen a und b Konstante, ω ¹⁾ die Frequenz und δ die Dämpfung des Schwingungskreises, hervorgerufen durch die im Kreise liegenden Ohmschen bzw. Verlustwiderstände ω , sind.

Die Konstanten a und b unserer Gleichungen sowie die Phasenverschiebungen φ_1 und φ_2 können wir unter Berücksichtigung folgender Bedingungen bestimmen. Zur Zeit $t = 0$ sind die Ladungen

$$1. Q_{1t} = Q, \quad Q_{2t} = 0$$

und die Ströme

$$2. \frac{dQ_1}{dt} = 0, \quad \frac{dQ_2}{dt} = 0.$$

¹⁾ Genau genommen, müßte man statt ω schreiben ω_0 , da der Einfluß der Dämpfung auf die Frequenz nicht berücksichtigt, ω also die Frequenz bedeutet, welche wir für $\delta = 0$ aus den Konstanten des Schwingungskreises berechnen. Vgl. die hiermit im Zusammenhang stehenden Ausführungen auf S. 48.

Endlich ist noch

$$3. q_1 + q_2 = Q$$

(nach Erreichung des stationären Zustandes).

Die Bedingung 2 ergibt:

$$\frac{dQ_1}{dt} = \omega a e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_1) - a \delta e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = \omega b e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_2) - b \delta e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Hieraus folgt für $t = 0$:

$$\omega \cos \varphi_1 - \delta \sin \varphi_1 = 0,$$

$$\omega \cos \varphi_2 - \delta \sin \varphi_2 = 0$$

oder

$$tg \varphi_1 = \frac{\omega}{\delta}, \quad tg \varphi_2 = \frac{\omega}{\delta}.$$

Nehmen wir der Übersichtlichkeit halber einmal an, daß die Dämpfung δ des Kreises verschwindend klein ist, so folgt:

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2}, \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2}.$$

Um die Konstanten a und b zu bestimmen, nehmen wir die Bedingungen 1 und 3 hinzu und erhalten:

$$q_1 + a \sin\left(\arctg \frac{\omega}{\delta}\right) = Q$$

$$q_2 + b \sin\left(\arctg \frac{\omega}{\delta}\right) = 0$$

$$a + b = 0, \quad a = Q - q_1, \quad b = -q_2 = -(Q - q_1).$$

Mithin ergibt sich jetzt für die Gleichungen 1) und 2):

$$Q_{1t} = q_1 + (Q - q_1) e^{-\delta t} \sin\left(\omega t + \arctg \frac{\omega}{\delta}\right)$$

$$Q_{2t} = (Q - q_1) - (Q - q_1) e^{-\delta t} \sin\left(\omega t + \arctg \frac{\omega}{\delta}\right).$$

Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß die Summe von Q_{1t} und Q_{2t} in jedem Augenblick gleich Q ist, Q_{1t} hat seinen Maximalwert für $\omega t = 0$, nämlich

$$Q_{1t} = q_1 + q_2 = Q.$$

Q_{2t} dagegen erreicht seinen Maximalwert im Falle $\delta = 0$ für $\omega t = \pi, 3\pi, 5\pi \dots$, und zwar

$$Q_{2t} = 2 Q_1 - 2 q_1 = 2 q_2.$$

Hieraus folgt, daß zwischen Q_{2t} und Q_{1t} eine Phasenverschiebung von 180° vorhanden ist und daß die an C_2 auftretende Spannung

$$E_{c_1} = \frac{2q_2}{C_2}$$

nach der Zeit $\omega t = \pi$ den doppelten Wert gegenüber dem Endzustand besitzt. Sind C_1 und C_2 gleich, so wird zur Zeit $\omega t = \pi$

$$E_{c_2} = 2E_{c_1}$$

(E_{c_1} und E_{c_2} die stationären Werte).

Wenn wir also parallel zu C_2 eine zweite Funkenstrecke F_2 legen, welche als Beleuchtungsfunkenstrecke dient, während F_1 die Auslösefunkenstrecke darstellt, und wenn wir F_2 auf maximale Funkenlänge einstellen, so können wir die Funkenstrecke F_2 auf die Spannung $2E_{c_1}$ einstellen und erhalten dann für $\omega t = \pi$, d. h. mit einer Zeitdifferenz von $\frac{T}{2}$ der entstehenden Schwingung,

gegenüber F_1 den Durchschlag. Dies gilt genau nur für den Fall $\delta = 0$. Da wir aber in Wirklichkeit stets mit einer gewissen Dämpfung zu rechnen haben, so erreicht Q_2 seinen Maximalwert nicht für $\omega t = \pi$, sondern zu einer Zeit, welche sich ergibt aus

$$\omega t + \operatorname{arctg} \frac{\omega}{\delta} = \frac{3\pi}{2},$$

d. h. also, da $\operatorname{arctg} \frac{\omega}{\delta}$ nicht gleich $\frac{\pi}{2}$ sondern kleiner ist, für

$$\omega t > \pi.$$

Die Verzögerung zwischen den beiden Funkenstrecken F_1 und F_2 wird also durch den Einfluß der Dämpfung vergrößert. Diese Vergrößerung von ωt ist jedoch, solange noch Oszillationen vorhanden sind, praktisch infolge des Verlaufes der Tangensfunktion vollkommen zu vernachlässigen, da ω stets sehr viel größer als δ sein, mithin $\operatorname{arctg} \frac{\omega}{\delta}$ nur wenig von $\operatorname{arctg} \infty$ abweichen wird. Größer ist natürlich infolge des Verlaufes der e -Funktion der Einfluß der Dämpfung auf E_{c_2} , und zwar ist hier der Maximalwert

$$E_{c_2} = \frac{2q_2}{C_2} e^{-\delta t}.$$

Diese durch die Dämpfungsverluste bewirkte Herabsetzung des nach einer Halbschwingung auftretenden Maximalwertes von

E_{c_2} hat jedoch praktisch nur insofern eine Bedeutung, als man die Länge der Beleuchtungsfunkenstrecke F_2 kleiner einstellen muß.

Wir müssen nun noch etwas näher auf das oben erhaltene Resultat, daß mit wachsender Dämpfung die Zeitdifferenz im Einsetzen der beiden Funksstrecken F_1 und F_2 vergrößert wird, eingehen, um einer mißverständlichen Auffassung der Vorgänge vorzubeugen.

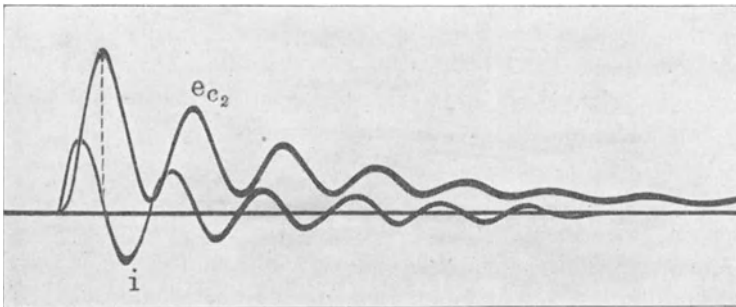
Die oszillatorische Aufladung des Kondensators C_2 , wie sie in dem weiter unten wiedergegebenen Oszillogramm der Fig. 25 dargestellt ist, muß sich stets in der Weise abspielen, daß zwischen dem Ladestrom und der Spannung am Kondensator eine Phasenverschiebung von $\omega t = \frac{\pi}{2}$ besteht. Man kann dies auch so ausdrücken, daß man sagt, der Kondensator wird so lange aufgeladen, bis der Ladestrom zu Null geworden ist. In diesem Augenblick hat die Spannung am Kondensator ihren Maximalwert erreicht. Unter keinen Umständen kann also die Phasenverschiebung zwischen dem Ladestrom und der Spannung am Kondensator größer als $\frac{\pi}{2}$ werden, da ja sonst der Kondensator bereits wieder durch den umgekehrten Ladestrom entladen werden würde. Andererseits besteht zwischen dem Entladestrom des Kondensators C_1 — identisch mit dem Ladestrom von C_2 — und der Spannung E_{c_1} eine Phasenverschiebung, welche für $\delta = 0$, $\omega t = \frac{\pi}{2}$, für $\delta = 0$ aber $< \frac{\pi}{2}$ ist. Man müßte also hieraus folgern, daß die Phasenverschiebung, zwischen E_{c_1} und E_{c_2} nur für $\delta = 0$ den Wert $\omega t = \pi$ erreicht, bei Vorhandensein von Verlusten aber stets $< \pi$ ist. Im Gegensatz hierzu ergibt aber unsere Rechnung, daß mit wachsender Dämpfung die Zeitdifferenz zwischen den Maximalwerten von E_{c_1} und E_{c_2} wächst und daß $\omega t > \pi$ wird. Dieser Widerspruch ist jedoch nur ein scheinbarer und folgendermaßen zu erklären: Nach dem in der Rechnung gemachten Ansatz bedeutet ω die Frequenz des Ladestromes für $\delta = 0$. Wir müßten also das Resultat unserer obigen Rechnung genauer so ausdrücken. Wenn δ nicht gleich 0 ist, wird die Phasenverschiebung zwischen E_{c_1} und E_{c_2} , gemessen unter Zugrundelegung der Frequenz ω_0 des ungedämpften Ladestromes, größer als π . Dagegen überschreitet natürlich die Phasenverschiebung den

Wert π nicht, wenn man sie an der Frequenz ω des gedämpft schwingenden Ladestromes mißt. Diese Tatsache ist identisch damit, daß infolge der Dämpfung die Frequenz des Ladestromes verkleinert, die Schwingungsdauer also vergrößert wird, und zwar ist

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2.$$

Je größer δ wird, um so mehr Zeit vergeht, absolut gemessen, bis der Kondensator C_2 seine Maximalspannung erreicht hat. In dem Grenzfall $\delta = \infty$ (aperiodische Aufladung) vergeht eine unendlich lange Zeit, bis der Kondensator seine maximale Ladung erhält. Man könnte nun noch daran denken, die in der Wechselstromtechnik übliche Darstellung der Schwingungsvorgänge mit

Fig. 24.



Hilfe eines Vektordiagrammes auf den vorliegenden Fall anzuwenden. Dies ist aber nur möglich für $\delta = 0$, da das Diagramm nur für Vorgänge gilt, welche sich mit konstanter Frequenz und Amplitude¹⁾ abspielen, was aber hier beim Vorhandensein von Verlusten nicht der Fall ist. Für $\delta = 0$ ergibt das Diagramm das bereits mehrfach abgeleitete Resultat, daß dann zwischen E_{c_1} und E_{c_2} eine Phasenverschiebung $\omega t = \pi$ besteht.

Endlich mögen die bisher geschilderten Vorgänge noch durch oszillatorische Aufnahmen (Fig. 24) erläutert werden. Die eine

¹⁾ Meines Wissens ist bisher nur einmal der Versuch gemacht worden [A. E. Kennelly, Proc. of the American Acad. of Arts and Sciences **46**, 373 (1911)], die vektorielle Darstellung auch auf gedämpfte Schwingungsvorgänge anzuwenden, jedoch wird in diesem Falle die Figur so kompliziert, daß der Hauptvorzug des Diagrammes, nämlich seine Übersichtlichkeit, vollkommen verloren geht.

Schleife des Oszillographen wurde in den Schwingungskreis¹⁾ (Fig. 22) direkt eingeschaltet und gibt den Verlauf des nach C_2 fließenden Ladestromes i wieder. Die zweite Schleife war an Stelle der Funkenstrecke F_2 parallel zum Kondensator C_2 gelegt. C_1 wurde nun aufgeladen und dann die Funkenstrecke F_1 geschlossen. Man sieht, daß sich dann der Kondensator C_2 oszillatorisch auflädt, wobei zwischen dem Ladestrom i und der Spannung e_{c_2} eine Phasenverschiebung von 90° besteht. Da nun zwischen dem Ladestrom und der Spannung e_{c_1} ebenfalls eine Phasenverschiebung von nahezu 90° vorhanden ist, so erhalten wir zwischen E_{c_1} und E_{c_2} eine Phasendifferenz von etwa 180° . Daß die gedämpfte Schwingung der Kondensatorspannung e_{c_2} in dem Oszillogramm allmählich sich dem Nullpunkt nähert, liegt daran, daß durch das Parallelschalten der Oszillographenschleife zum Kondensator C_2 dieser langsam entladen wird. Wäre dies nicht der Fall, hätte also z. B. ein statischer Oszillograph zur Verfügung gestanden, so würde die gedämpfte Schwingung von E_{c_2} sich mehr und mehr dem stationären Werte E_{c_2} nähern, also um eine Gerade pendeln, welche im Abstände E_{c_2} parallel zur Nulllinie verläuft. In diesem Falle würde man ein Oszillogramm erhalten, wie es in Fig. 25 wiedergegeben ist, bei welchem die durch die Oszillographenschleife verursachte Entladung stets von der konstanten Netzspannung aus (Kondensator C_1 sehr groß gegenüber C_2) nachgeliefert wird.

Als Resultat unserer bisherigen Betrachtungen ergibt sich also, daß wenn wir eine bestimmte Zeitdifferenz t zwischen den beiden Funkenstrecken F_1 und F_2 herstellen wollen, wir die Frequenz des aus $C_1 L C_2$ gebildeten Schwingungskreises durch passende Wahl seiner Konstanten auf einen solchen Wert einzustellen haben, daß die gewünschte Zeitdifferenz $t = \frac{T}{2}$ wird, wobei

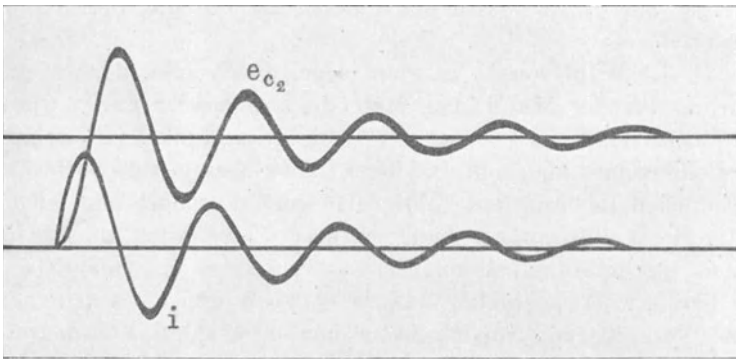
$$T = 2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}$$

ist. Genau gilt dies allerdings nur dann, wenn die Funkenstrecke F_2 auf den Maximalwert eingestellt und keine Dämpfung im

¹⁾ Auch hier waren die elektrischen Konstanten des Schwingungskreises so bemessen, daß die Eigenschwingungsdauer des Kreises unterhalb derjenigen der Meßschleifen lag. Die Funkenstrecke F_1 war wiederum durch einen Schalter ersetzt.

Kreise vorhanden ist. Wählt man die Funkenlänge von F_2 kleiner als es der Maximalspannung entspricht, so wird damit auch die Verzögerung kleiner, ebenso wie dies schon bei der Machschen Methode auseinandergesetzt worden ist. Änderungen in der Verzögerung werden ferner durch Schwankungen im Einsatzpotential der Funkenstrecke F_2 hervorgerufen, die aber, wenigstens für ballistische Zwecke, wohl stets innerhalb der zulässigen Schwingungsgrenzen liegen dürften. Kommt es jedoch für besondere physikalische Untersuchungen darauf an, konstante Zeitdifferenzen bzw. Phasenverschiebungen zu erhalten, so muß man, z. B. durch

Fig. 25.



Belichtung mit ultraviolettem Licht, das Einsatzpotential von F_2 möglichst konstant zu halten suchen. Auch Schwankungen in der Dämpfung muß man dann nach Möglichkeit vermeiden, da diese ja ebenfalls Änderungen in der Verzögerungszeit zur Folge haben. Für die Größe der Dämpfung sind nun im wesentlichen maßgebend die in der Funkenstrecke F_1 auftretenden Verluste. Auf diese hat aber die in C_1 befindliche Anfangsladung großen Einfluß. Ist nämlich die zur Entladung kommende Elektrizitätsmenge Q größer, so wird hierdurch die Leitfähigkeit der Funkenstrecke F_1 besser und infolgedessen ihr Verlustwiderstand geringer. Entsprechend ist bei kleinerer Elektrizitätsmenge Q das Umgekehrte der Fall. Wenn man also möglichst konstante Verzögerungszeiten erhalten will, so muß man die Aufladung von C_1 stets bis zu dem gleichen Potential vornehmen, z. B. dadurch, daß man die Influenzmaschine stets die gleiche Zeit hindurch laden läßt. Insbesondere bei ballistischen Versuchen ist dies deswegen von

großer Bedeutung, weil hier die Ladung nicht durch die Einsatzspannung von F_1 bestimmt ist, da ja die Entladung in F_1 nicht im Augenblick der Erreichung der Durchschlagsspannung einsetzt, sondern das hindurchfliegende Geschoß je nach seiner Stellung zu den Elektroden bald kleinere, bald größere Funkenlängen herstellen kann. Man muß sich daher von dieser Funkenspannung dadurch unabhängig machen, daß man stets die gleiche Elektrizitätsmenge Q auf C_1 anhäuft und zur Entladung bringt.

Die günstigste Ausnutzung der in C_1 aufgespeicherten Energie erhält man nun, wenn $C_1 = C_2$ gemacht wird. In diesem Falle befindet sich nämlich nach einer Halbschwingung die gesamte Energie auf C_2 und wird im Funken F_2 für die Beleuchtung verwertet.

In der Wahl von C_2 ist man jedoch beschränkt, da, wie ausführlich bei der Machschen Methode auseinandergesetzt wurde, bei zu großem C_2 die Dauer des Beleuchtungsfunkens F_2 zu lang wird. Bestimmt man nun dasjenige C_2 , welches gerade noch allen Ansprüchen in bezug auf Bildschärfe genügt, wobei man gleichzeitig die Leitungen zur Funkenstrecke F_2 so kurz als möglich macht, um deren Selbstinduktion herabzusetzen, so ist damit auch die Größe von C_1 gegeben, da ja C_1 stets gleich C_2 sein muß. Eine Vergrößerung von C_1 hätte nur insofern eine Bedeutung, als man dann, wie wir bereits oben gesehen haben, in F_2 größere Spannungen und damit größere Energie erhält. Andererseits sind aber mit der Verwendung einer gegenüber C_2 großen Kapazität C_1 , auch abgesehen von der ungünstigeren Energieausnutzung, ganz erhebliche Nachteile verbunden, welche wenigstens für Einzelaufnahmen diese Anordnung unbrauchbar machen. Ist nämlich C_1 sehr groß im Vergleich zu C_2 , so wird nach der ersten Halbschwingung und dem damit verbundenen Einsetzen von F_2 die dem Kondensator C_1 entzogene Energie so gering sein, daß seine Spannung e_{c_1} nicht wesentlich gesunken ist und infolgedessen bei der nächsten Halbschwingung wiederum die Einsatzspannung von F_2 erreicht wird, mithin ein zweiter Funke übergeht usw., bis infolge der durch die Funken in F_2 herbeigeführten Energieentziehung die Spannung e_{c_1} so stark abgenommen hat, daß e_{c_2} nun mit Sicherheit unterhalb der Einsatzspannung von F_2 liegt. Die Entstehung mehrerer Einzelfunken, wie sie hier geschildert ist, wird aber nur dann eintreten, wenn die Funkenstrecke F_2 eine

genügende Löschwirkung besitzt, wenn also die pro Funken zur Entladung kommende Energiemenge gering ist, bzw. wenn in die Zuleitungen von C_2 zu F_2 besondere Löschfunkenstrecken eingeschaltet werden, deren Anwendung bereits bei der Machschen Methode als zweckmäßig empfohlen wurde. Ist dagegen die Löschwirkung der Funkenstrecke F_2 schlecht, bleibt sie also noch einige Zeit nach Entladung des Kondensators C_2 ionisiert, so bildet sie gleichsam einen Kurzschluß für C_2 , und die gesamte nachfolgende Entladung von C_1 verläuft über die Funkenstrecke F_1 , die Selbstinduktion L und die Funkenstrecke F_2 . Man erhält dann natürlich in F_2 einen verhältnismäßig langdauernden Funken und damit vollkommen unscharfe Bilder. Gerade diese Gefahr wird sicher vermieden, wenn man $C_1 = C_2$ macht, da dann nach dem früher Gesagten kein Energienachschub mehr erfolgen kann. Während also bei der Machschen Methode die Verkleinerung der für die Beleuchtungsfunkenstrecke maßgebenden Kapazität gegenüber der Kapazität des Schwingungskreises keine Gefahr bietet, ist hier jede Abweichung von der Bedingung $C_1 = C_2$ mit Nachteilen verbunden.

Anders liegen nun die Verhältnisse, wenn man nicht einen einzigen Funken, sondern Serien von schnell aufeinander folgenden Funken, z. B. für Zwecke der Vielfachfunkenphotographie herstellen will. In diesem Falle muß man C_1 möglichst groß gegenüber C_2 wählen, um so absichtlich den oben geschilderten Vorgang mehrerer aufeinander folgender Funkenentladungen der Kapazität C_2 hervorzurufen. Kommt es dann noch darauf an, den zeitlichen Abstand zwischen zwei Beleuchtungsfunken möglichst klein zu erhalten, so wird man, da eine Entladung ja immer nur nach einer Halbschwingung einsetzt, wenn die Funkenstrecke F_2 nahezu auf ihren Maximalwert eingestellt ist, die Schwingungsdauer des Hauptkreises möglichst kurz wählen, mithin die Selbstinduktion recht klein machen. Eine Grenze ist dieser Verkleinerung von L allerdings insofern gezogen, als bei zu kleiner Selbstinduktion die Entladung zu stark gedämpft wird.

Bisher haben wir uns nur mit der oszillatorischen Form der Entladung beschäftigt. Es ist aber noch erforderlich, daß wir wenigstens einige kurze Betrachtungen der aperiodischen Entladung widmen. Diese können wir erhalten entweder durch Wahl einer großen Kapazität bei kleiner Selbstinduktion oder durch

Einschalten von Widerständen. Letzteres ist natürlich der unzweckmäßigere Weg, da er stets mit unnötigen Energieverlusten verbunden ist. Gegenüber der oszillatorischen Entladung hat die aperiodische, worauf bereits gelegentlich der Besprechung der Machschen Methode hingewiesen worden ist, den Mangel, daß bei ihr der Augenblick für das Einsetzen der Entladung in der Funkenstrecke F_2 keineswegs genau definiert ist und daß daher Schwankungen im Einsatzpotential von erheblich stärkerem Einfluß sind. Andererseits bietet aber die aperiodische Entladungsform die Möglichkeit, größere Verzögerungen herzustellen und insbesondere auch diese Verzögerungen innerhalb ziemlich weiter Grenzen durch Änderung der Länge der Funkenstrecke F_2 zu variieren. Von dieser Form der Töplerschen Verzögerungsschaltung in Verbindung mit der Schattenschlierenmethode von Dvorak und Boys¹⁾ haben in neuerer Zeit zum Zweck der Untersuchung von Schallwellen A. Foley und H. Souder²⁾ Gebrauch gemacht; nachdem ähnliche Versuche gleichfalls mit der Töplerschen Anordnung bereits früher von Wood³⁾ angestellt waren, und zwar, nach der Beschreibung ihrer Versuche und den mitgeteilten Abbildungen zu urteilen, mit recht gutem Erfolge. Allerdings gehen die Verfasser an keiner Stelle auf den hier dargelegten Mechanismus der von ihnen benutzten Schaltung ein. Wahrscheinlich haben sie denselben auch gar nicht richtig erkannt, da, abgesehen von konstruktiven Abänderungen, lediglich dieselben rein praktischen Erfahrungen mitgeteilt werden, welche schon von Töpler aufgefunden und angegeben worden sind. Mit Rücksicht auf die vom physikalischen Standpunkt vorzüglich gelungenen Aufnahmen (Demonstration des Huyghensschen Prinzips, Brechung und Reflexion von Schallwellen usw.) schien es mir jedoch von Wert zu sein, auf diese Arbeit noch besonders aufmerksam zu machen. In diesem Zusammenhange möchte ich ferner noch darauf hinweisen, daß die Töplersche Methode ein verhältnismäßig einfaches Mittel darstellt, um ein „elektrisches Stroboskop“ für sehr schnell sich abspielende Vorgänge zu konstruieren, indem man die ladende

¹⁾ V. Dvorak, Wied. Ann. **9**, 502, 1880; V. Boys, Nature **47**, 415 u. 440, 1893.

²⁾ Artur Foley u. Wilmer H. Souder, Phys. Rev. **35**, 373, 1913.

³⁾ R. W. Wood, Phys. Optics, S. 30, 48, 96. New York, Verlag The Macmillan Co., 1911.

Influenzmaschine dauernd an C_1 angeschlossen läßt und auf diese Weise die Funkenstrecke F_1 in kurzen Zeitabständen zum Einsetzen bringt. Verwendet man dann, um etwa den Vorgang der Ausbreitung von Schallwellen zu verfolgen, die Funkenstrecke F_1 als Schallerreger und die mit einer bestimmten Verzögerung gegenüber F_1 einsetzende Funkenstrecke F_2 als Beleuchtungsfunkenstrecke bei gleichzeitiger Benutzung einer Schlierenmethode, so kann man z. B. durch allmähliche Änderung der Selbstinduktion und damit der Verzögerungszeit die Ausbreitung der Schallwellen analog der Arbeitsweise mechanischer Stroboskope mit beliebiger Geschwindigkeit auf dem Beobachtungsschirm erscheinen lassen. Die Zahl der Entladungen in F_1 braucht dabei nur so groß zu sein, daß die Trägheit des Auges genügt, um die Pausen zu überbrücken. Vielleicht bietet ein derartiges elektrisches Stroboskop, da es mit beliebigen Geschwindigkeiten arbeiten kann, noch für manche physikalische Untersuchungen ein wertvolles Hilfsmittel.

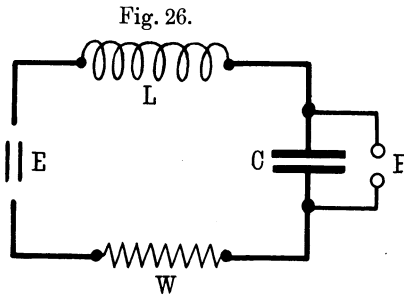
In etwas anderem Zusammenhange, nämlich zur Erzeugung phasenverschobener Hochfrequenzschwingungen für Zwecke der gerichteten drahtlosen Telegraphie, ist endlich die Töplersche Methode von Mandelstam und Papalex¹⁾ angewendet worden, allerdings mit einigen Modifikationen, welche durch den von ihnen verfolgten Zweck bedingt waren. Da die eingehende Besprechung dieser Anordnung außerhalb des Rahmens dieses Buches liegt, so soll an dieser Stelle nur auf die Originalarbeit und einige mit ihr im Zusammenhang stehende weitere Veröffentlichungen hingewiesen werden. Nicht unerwähnt möchte ich dabei lassen, im Anschluß an eine das gleiche Thema behandelnde Dissertation von Bätge²⁾, daß die Töplersche Methode bzw. die abgeänderte Anordnung nach Mandelstam und Papalex unter Benutzung des Kerrschen Phänomens die Möglichkeit bietet, die Zeitdauer eines Beleuchtungsfunkens direkt zu messen, was nicht nur mit Rücksicht auf die Anwendungen in der Ballistik, sondern auch vom Standpunkt des Hochfrequenztechnikers, z. B. bei Löschfunkenstrecken, von Wert wäre.

¹⁾ L. Mandelstam u. N. Papalex, Phys. Zeitschr. **7**, 303 (1906); A. Jollos, Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Teleph. **1**, 215, 1907; Zenneck, Lehrbuch d. drahtl. Telegr., S. 425. Verlag von Ferd. Enke, 1903.

²⁾ E. Bätge (Reval), Inaugural-Dissert., Univers. Straßburg 1907. Verlag von Joh. Amb. Barth in Leipzig.

Ich habe auch diese Anwendung der Funkenverzögerungsmethoden hier noch besonders hervorgehoben, weil sie wiederum beweist, welche vielseitigen Möglichkeiten diese in der Physik noch recht wenig bekannten Methoden bieten.

Im Anschluß an die Töplersche Methode möchte ich ferner noch den Fall der Aufladung eines Kondensators durch eine konstante Netzspannung unter Vorschaltung von Selbstinduktion und Widerstand behandeln, einmal, weil dieser Vorgang in engstem Zusammenhange mit der Töplerschen Anordnung steht, und dann, weil wir später in der Mehrfachfunkenphotographie von dieser Schaltung noch Gebrauch machen müssen.



Bei der Töplerschen Methode wird ein Kondensator, nämlich C_2 , unter Vorschaltung von Selbstinduktion und Ohmschem Widerstand aufgeladen, jedoch steht bei dieser Aufladung nicht eine konstante Spannung E , sondern nur eine bestimmte Elektrizitätsmenge Q zur Ver-

fügung. Der jetzt zu behandelnde Fall entsteht also aus dem bei der Töplerschen Schaltung berechneten dadurch, daß man gleichsam die Kapazität C_1 unendlich groß macht, d. h. eine konstante Spannungsquelle E zur Verfügung stellt.

Diese Spannungsquelle muß allerdings genügend Energie besitzen, damit während der Ladung des Kondensators die Spannung nicht abfällt. Ungeeignet ist hierfür z. B. eine Influenzmaschine allein, weil diese nur eine beschränkte Elektrizitätsmenge zu liefern imstande ist. Da andererseits Hochspannungsbatterien, bzw. Maschinen für die hier erforderlichen hohen Spannungen zu umständlich sind, so schafft man sich praktisch eine Stromquelle genügender Kapazität durch eine große Kondensatorbatterie, welche zunächst von einer Influenzmaschine so lange aufgeladen wird, bis in ihr eine hinreichende Energie aufgespeichert ist. Derartige Hochspannungsquellen großer Kapazität werden in der Ballistik vielfach verwendet¹⁾. Für die Betrachtung des prinzipiellen Vorganges genügt

¹⁾ Vgl. auch die Methode von Schatte zur Erzeugung hoher Funkenfrequenzen. Viertes Kapitel.

natürlich die Annahme, daß eine konstante Spannung E zur Verfügung steht, welche zur Aufladung des Kondensators C benutzt wird.

In die Ladeleitung wollen wir, um den allgemeinsten Fall zu erhalten, eine Selbstinduktion L und einen Ohmschen Widerstand W einschalten, so daß wir dementsprechend das Schaltungs-schema der Fig. 26 erhalten. Sobald nun der Strom anfängt zu fließen, haben wir einen Spannungsabfall, am Widerstand e_W , an der Selbstinduktion e_L und am Kondensator e_c .

Diese drei Teilspannungen sind in jedem Augenblick von der Ladespannung E zu decken, so daß die Bedingung erfüllt sein muß:

$$E = e_W + e_L + e_c \dots \dots \dots 1)$$

Die Werte der Einzelspannungen sind dabei durch folgende Ausdrücke gegeben:

$$e_W = iW, \quad e_L = L \frac{di}{dt}, \quad e_c = \frac{q}{C}.$$

Wollen wir nun an Stelle der Momentanwerte i des Stromes die Momentanwerte q der auf den Kondensator fließenden Elektrizitätsmenge einführen, so stehen uns hierfür folgende Beziehungen zur Verfügung:

$$q = \int i dt, \quad i = \frac{dq}{dt}, \quad \frac{di}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}.$$

Durch Einsetzen sämtlicher Größen in Gleichung 1) folgt:

$$E = W \frac{dq}{dt} + L \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{C}$$

oder

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{W}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot q = \frac{E}{L} \dots \dots \dots 2)$$

Da wir es hier mit einer gedämpften Schwingung zu tun haben, so wollen wir noch den Dämpfungsexponenten δ und die Frequenz ω für die entstehende gedämpfte Schwingung, sowie ω_0 für diejenige Frequenz einführen, welche wir erhalten würden, wenn $\delta = 0$ wäre. Es bestehen dann zwischen diesen Größen δ , ω , ω_0 und W , L , C folgende Beziehungen:

$$2\delta = \frac{W}{L}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad \omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2.$$

Die Entladung selbst wird für

1. $\omega_0 > \delta$. . . oszillatorisch,
2. $\omega_0 = \delta$. . . aperiodisch,
3. $\omega_0 < \delta$. . . überaperiodisch.

Von diesen drei Fällen kommen für den vorliegenden Zweck nur die beiden ersten in Frage, und zwar ist die allgemeine Lösung der obigen Differentialgleichung 2) für Fall 1:

$$q = \frac{E}{L\omega_0^2} + a e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \dots \dots \dots 3)$$

wo a eine Integrationskonstante und φ die Phasenverschiebung, vom Einschaltmoment $t = 0$ an gerechnet, bedeutet. Die Größen a und φ ergeben sich unter Berücksichtigung der Anfangsbedingungen:

1. $q = 0$ für $t = 0$,
2. $i = \frac{dq}{dt} = 0$ für $t = 0$.

Für diese ergibt Gleichung 3):

$$\begin{aligned} 0 &= EC + a \sin \varphi, \\ 0 &= a(\omega \cos \varphi - \delta \sin \varphi), \end{aligned}$$

d. h.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega}{\delta}, \quad \sin \varphi = \frac{\omega}{\omega_0}$$

und

$$a = -EC \frac{\omega_0}{\omega}.$$

Setzen wir diese Werte in Gleichung 3) ein, so folgt:

$$q = EC \left[1 - \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin \left(\omega t + \operatorname{arctg} \frac{\omega}{\delta} \right) \right].$$

Nehmen wir nun zunächst einmal an, daß $\delta = 0$ ist, so finden wir, daß für $\omega t = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ q den Maximalwert $2EC$ erhält. Ist die Schwingung entsprechend den praktischen Verhältnissen gedämpft, so wird das erste Maximum von q und damit auch dasjenige von $e_c = \frac{q}{C}$, in diesem Falle jedoch dem absoluten Wert nach je nach der Größe von δ kleiner als $2E$, erreicht für $\omega t > \pi$. Im einzelnen liegen die Verhältnisse hier ebenso, wie sie oben bei der Aufladung des Kondensators in der Töplerschen Schaltung besprochen worden sind.

Nach Ablauf der gedämpften Schwingung herrscht an dem Kondensator die Spannung E . Das in Fig. 27 wiedergegebene Oszillogramm stellt den Verlauf des Ladestromes i und den der Spannung e_c am Kondensator dar. Man erkennt die oszillatorische

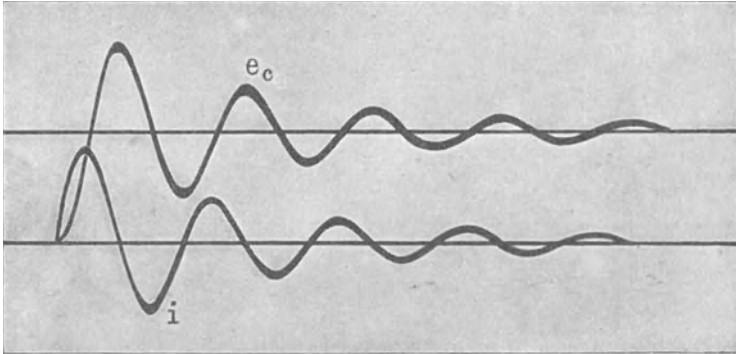
Aufladung des Kondensators und sieht, daß angenähert für $\omega t = \pi$ das erste Maximum der Kondensatorspannung

$$e_c = E(1 + e^{-\delta t})$$

erreicht wird.

Schalten wir nun wiederum parallel zu C eine Funkenstrecke F , so wird diese bei Einstellung auf die Maximalschlagweite im Idealfall $\delta = 0$ mit einer Verzögerung von $\frac{T}{2}$ der entsprechenden Ladeschwingung, vom Zeitpunkt der Einschaltung an gerechnet, einsetzen, so daß wir also auch bei dieser Anordnung eine zeitliche Verzögerung des Funkens F (Beleuchtungsfunken) nach

Fig. 27.



erfolgter Auslösung, in diesem Falle Einschaltung der Ladeleitung, erhalten.

Wir wollen nun die zweite Form der Aufladung des Kondensators betrachten, nämlich die aperiodische. Für diesen Fall, welcher durch die obige Bedingung 2 charakterisiert ist, ergibt die Lösung der Differentialgleichung 2):

$$q = EC + ae^{-\delta t}(1 + \delta t).$$

Für $t = 0$ ist wiederum $q = 0$ und somit

$$0 = EC + a, \quad a = -EC,$$

so daß wir erhalten:

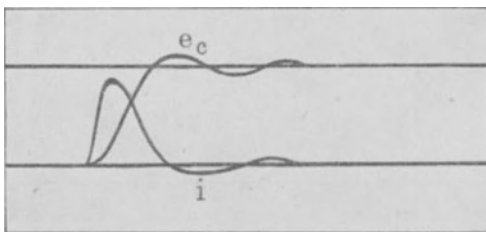
$$q = EC[1 - e^{-\delta t}(1 + \delta t)]$$

und

$$E = \frac{q}{C} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\delta t}(1 + \delta t)}.$$

Aus dieser Gleichung folgt, daß bei aperiodischer Aufladung die Spannung e_c am Kondensator nie den Wert der Ladespannung übersteigen kann, ihn vielmehr theoretisch erst für $t = \infty$ erreicht. Das in Fig. 28 wiedergegebene Oszillogramm zeigt auch diesen Vorgang¹⁾ für einen Kreis von gleichen Konstanten wie bei der Aufnahme des Oszillogramms der Fig. 27, jedoch nach Einschaltung von etwa 1000Ω Widerstand, und zwar wiederum den Verlauf von Ladestrom i und Spannung e_c am Kondensator. Wollte man also diese Anordnung zur Erzeugung eines Beleuchtungsfunkens in F verwenden, so dürfte man dessen Länge höchstens auf den der Ladespannung entsprechenden Wert E einstellen, jedoch ist diese Schaltung, bei welcher die Ladung des Kondensators aperiodisch vor sich geht, aus den bereits früher mehrfach dar-

Fig. 28.



gelegten Gründen nicht zu empfehlen und hier nur der Vollständigkeit halber behandelt.

Es ist nun vielleicht nicht unzumutbar, um auch Klarheit über den elektrischen Wirkungsgrad der verschiedenen An-

ordnungen zu erhalten, wenn wir uns den bei der Aufladung des Kondensators sich abspielenden Vorgang nochmals unter Berücksichtigung der Energieverhältnisse im Ladekreis klarmachen. Nehmen wir zunächst einmal an, wir hätten in der Ladeleitung nur Ohmschen Widerstand, so ist die gesamte aufgewendete Energie A gegeben durch

$$A = \int_0^{\infty} (i e_w dt + i e_c dt)$$

oder

$$A = \int_0^{\infty} i^2 w dt + \int_0^{\infty} i \frac{q}{c} dt.$$

Jedes der beiden Integrale ergibt aufgelöst den Wert

$$\frac{CE^2}{2},$$

¹⁾ Die Ladung ist noch nicht vollkommen aperiodisch.

so daß also stets der Energieverlust in der Ladeleitung, dargestellt durch das erste Integral, gleich der im Kondensator aufgespeicherten Energie, dargestellt durch das zweite Integral, ist. Dies bedeutet, daß, wenn nur Ohmscher Widerstand in der Ladeleitung vorhanden ist, von der gesamten aufgewendeten Energie nur die Hälfte im Kondensator nutzbar verwertet werden kann. Man könnte nun, um die Verhältnisse günstiger zu gestalten, daran denken, den Vorschaltwiderstand kleiner zu wählen. Dies hätte aber lediglich eine Vergrößerung des Stromes zur Folge, ohne daß es gelingen würde, den Energieverlust

$$\int_0^{\infty} i^2 w dt$$

herabzusetzen.

Es ist also unmöglich, bei einer derartigen Anordnung, bei alleiniger Einschaltung von Widerstand in die Ladeleitung, einen höheren Wirkungsgrad als 50 Proz. zu erzielen. Viel günstiger liegen die Verhältnisse, wenn wir in die Zuleitung einen rein induktiven Widerstand legen. Ein solcher wirkt nicht energieverzehrend, sondern speichert lediglich die Energie so lange in sich auf, als der Strom in der Leitung zunimmt, um dann bei sinkendem Strom die gesamte Energie wieder abzugeben, so daß im Augenblick des Durchganges des Stromes durch Null in der Vorschaltselfinduktion keine Energie mehr vorhanden ist. Unterbricht man also den Ladevorgang, wie er in Fig. 27 dargestellt ist, in dem Augenblick, in welchem der oszillatorisch verlaufende Ladestrom zum ersten Male durch Null geht, d. h. bringt man in diesem Augenblick die Funkenstrecke F zum Einsetzen, so ist die gesamte aufgewendete Energie lediglich in der Kapazität aufgespeichert und man kann sie voll im Funken F verwerten. Der Mehrbetrag an Energie, welcher bei dieser Schaltung gegenüber der ersten (im Grenzfall aperiodische Aufladung) in dem Kondensator C erzielt ist, wird hier von derjenigen Energie geliefert, welche ursprünglich in Form von kinetischer Energie in der Selbstinduktion enthalten war. Da somit die gesamte, auch in der Zuleitung angesammelte Energie nutzbar verwertet wird, so ist ersichtlich, daß man im Falle einer verlustlosen Selbstinduktion bei Unterbrechung des Ladevorganges nach einer halben Periode der Stromschwingungen für die Aufladung des Kondensators einen Wirkungsgrad von 100 Proz. erreichen kann. Praktisch

liegen natürlich die Verhältnisse stets so, daß auch in der Selbstinduktion Verluste vorhanden sind, daß also der Wirkungsgrad von 100 Proz. nie erreicht werden kann. Jedenfalls ist es aber bei geeigneter Konstruktion der Selbstinduktion ohne weiteres möglich, durch Verwendung der oszillatorischen Aufladung des Kondensators einen erheblich besseren Wirkungsgrad als 50 Proz., wie er im günstigsten Falle bei aperiodischer Aufladung vorhanden ist, zu erzielen¹⁾.

Auch die Spannungssteigerung an dem Kondensator ergibt sich aus der Betrachtung der Wirkungsweise der Selbstinduktion. Innerhalb der Zeit nämlich, während welcher der Ladestrom auf seinen Maximalwert ansteigt, erzeugt die Selbstinduktion eine der Ladespannung entgegengesetzte elektromotorische Kraft. Bei Abnahme des Stromes dagegen, also während der zweiten Viertelperiode, ist die erzeugte elektromotorische Kraft der Ladespannung gleichgerichtet und erreicht im Augenblick des Stromdurchganges durch Null für den Idealfall einer verlustlosen Selbstinduktion denselben absoluten Wert wie die Ladespannung, d. h. also: im Augenblick des ersten Stromdurchganges durch Null entsteht an der Kapazität infolge der Wirkung der Selbstinduktion eine Spannung

$$e_c = E + e_L = 2E,$$

d. h. von doppelter Höhe. Sind Verluste vorhanden, so wird dieser Idealwert nicht vollkommen erreicht.

In bezug auf die eventuelle praktische Verwertung dieser Methode der oszillatorischen Aufladung eines Kondensators durch eine konstante Spannung für ballistische Zwecke genügt es, auf die früheren Auseinandersetzungen hinzuweisen, da sich bei deren sinngemäßer Anwendung alles Notwendige ohne weiteres ergibt. Im allgemeinen wird man jedoch diese Methode für Einfachfunkenphotographie nur in der Form der Töplerschen Schaltung benutzen, weil bei dieser die Auslösung durch die Funkenstrecke F_1 praktisch einfacher und sicherer mittels eines Geschosses auszuführen ist, als das Schließen des Stromes bei der zuletzt besprochenen Schaltung.

Obwohl nun die Töplersche Methode keine prinzipiellen Nachteile gegenüber der Machschen besitzt, ist sie doch bisher in der Ballistik wenig oder gar nicht angewendet worden, haupt-

¹⁾ Hierauf ist meines Wissens zum ersten Male von Rein in seiner Arbeit über radiotelegraphische Gleichstromtönsender, Physikal. Zeitschr. **11**, 591 (1910), hingewiesen worden.

sächlich wohl deswegen, weil die einzuhaltenden Versuchsbedingungen noch nie klargelegt worden sind, ohne deren Beachtung keine Erfolge erzielt werden können.

e) Herstellung von Verzögerungen mittels eines Funkeninduktors.

Eine dritte Methode zur Herstellung von Zeitdifferenzen zwischen dem Augenblick der Auslösung und dem Einsetzen des Beleuchtungsfunkens bietet die Verwendung eines Funkeninduktors, und zwar in der Schaltung, welche durch Fig. 29 dargestellt ist. *B* bedeutet eine Batterie, welche die Primärwicklung *P* speist. An die Sekundärwicklung *S* ist der Kondensator *C*₂ angeschlossen, zu welchem parallel die Beleuchtungsfunkensstrecke *F* gelegt ist. In die Zuleitung zur Primärwicklung ist die Auslösevorrichtung *A* geschaltet, die z. B. aus einem Kupferstreifen besteht, welchen das Geschöß beim Hindurchfliegen zerreißt. In diesem Augenblick wird der Primärstrom unterbrochen und die sekundär entstehende Spannung ladet den Kondensator auf, welcher sich einerseits wieder nach Erreichung der Einsatzspannung der Funkenstrecke *F* über diese entlädt. Dabei kann der Vorgang der Aufladung von *C*₂ entweder oszillatorisch oder aperiodisch erfolgen, je nach der Dimensionierung des Sekundärkreises, und zwar erhält man, wenn *W* der Widerstand, *L* die Selbstinduktion und *C* die Kapazität des Sekundärkreises (verteilte Kapazität der Wicklung + angeschlossene Kapazität *C*) sind, für

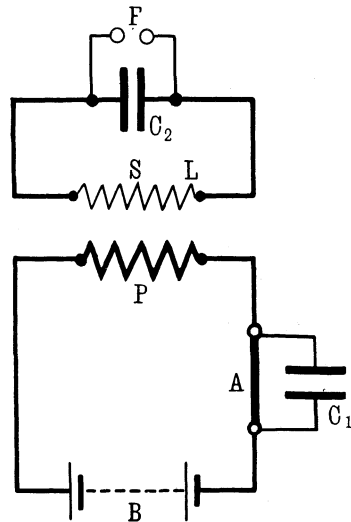
$$W^2 < \frac{4L}{C}$$

eine oszillatorische, und für

$$W^2 > \frac{4L}{C}$$

eine aperiodische Aufladung.

Fig. 29.

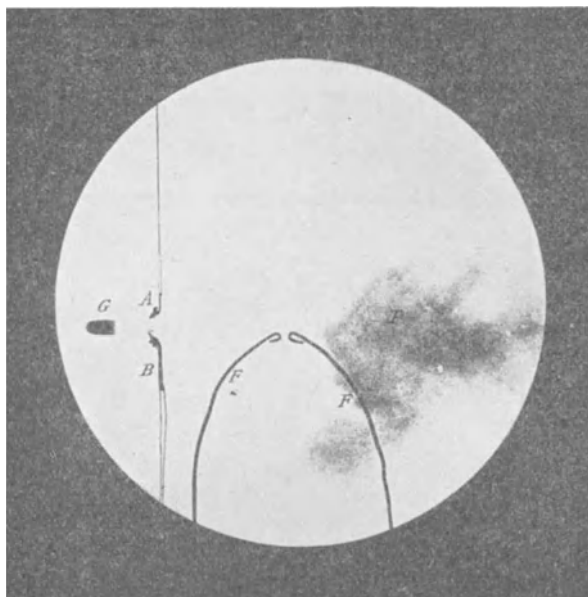


Im Fall der oszillatorischen Aufladung setzt bei Einstellung auf den Maximalwert die Funkenstrecke F nach Erreichung des ersten Spannungsmaximums an C ein, d. h. also mit einer Verzögerung $\lambda/4$ der sekundär entstehenden Schwingung. Da nun L im allgemeinen recht groß ist, so sind auch die auf diese Weise erhaltenen Verzögerungen sehr beträchtlich und unter Umständen für viele Zwecke nicht verwendbar. Stellt man die Funkenstrecke F dagegen nicht auf den Maximalwert ein, so treten mehrere Funken nacheinander auf, was man bei einiger Übung leicht an dem Knall des Funkens erkennen kann. Die aperiodische Entladungsform wird auch hier meist zu vermeiden sein, obwohl sie, wie man leicht einsieht, etwas größere Sicherheit in bezug auf Vermeidung von Nachfunken bietet. Eine Aufnahme des fliegenden Geschosses, welche nach diesem Induktorverfahren hergestellt wurde, ist in Fig. 30 wiedergegeben¹⁾. Die Verzögerung ist hier möglichst klein gewählt, um alle Teile der Anordnung gleichzeitig im Gesichtsfeld zu erhalten. AB ist ein Stanniolstreifen, welcher in die Primärleitung des Induktors eingeschaltet ist und von dem Geschoß G zerrissen wird. Die Mündung der Pistole befindet sich etwas außerhalb des rechten Randes der Figur in der Nähe der Stelle, an welcher gerade noch die ausströmenden Pulvergase sichtbar sind. FF ist die Beleuchtungsfunkenstrecke, welche man sich natürlich nicht in der Ebene der Figur, sondern weiter vorn zu denken hat und welche nur deswegen auf der photographischen Platte miterscheint, weil sie durch ihr eigenes Licht beleuchtet wird. Zahlreiche praktische Versuche mit diesem Verfahren haben nun gezeigt, daß es sehr schwer ist, mit dieser Methode auch nur einigermaßen konstante Verzögerungen zu erzielen. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich darin, daß die Unterbrechung des Stromes infolge einer bald größeren, bald kleineren Lichtbogenbildung an der Unterbrechungsstelle im Primärkreis zu etwas verschiedenen Zeiten erfolgt. Natürlich muß man, um überhaupt genügende Energie im Sekundärkreis zu erhalten — der Wirkungsgrad eines derartigen Induktors ist sehr schlecht —, dafür sorgen, daß die Unterbrechung des Primärstromes so exakt als möglich erfolgt. Man erreicht dies dadurch, daß man

¹⁾ Ich verdanke diese Aufnahme der Liebenswürdigkeit des Herrn Geheimrat Cranz.

parallel zu der Unterbrechungsstelle einen geeignet dimensionierten Kondensator C_1 (Fizeauscher Kondensator, Fig. 29) schaltet. Die Wirkungsweise dieses Kondensators ist erst in neuerer Zeit in einwandfreier Weise von Burstyn¹⁾ aufgeklärt worden. Burstyn hat nämlich darauf hingewiesen, daß in dem aus dem Kondensator C_1 , seinen Zuleitungen zur Unterbrechungsstelle und dem in dieser entstehenden Lichtbogen gebildeten Schwingungskreise eine gedämpfte Schwingung von einer durch die Größe des Kondensators und der Unterbrechungsspannung abhängigen Amplitude

Fig. 30.



entsteht, welche für den Vorgang der Stromunterbrechung in der Primärwicklung von wesentlicher Bedeutung ist. Ihrer Wichtigkeit halber wollen wir diese Erscheinung an Hand der Fig. 31 etwas eingehender betrachten. Sobald an der Stelle A die Unterbrechung eingeleitet und nun zunächst ein Lichtbogen gebildet wird, beginnt die Aufladung des Kondensators c , und zwar im allgemeinen in oszillatorischer Form. Der Strom J , welcher in dem aus der Kapazität C_1 ihren Zuleitungen und dem Lichtbogen gebildeten

¹⁾ Burstyn, Elektrot. Ztg. **34**, 1225 (1913).

Hochfrequenzkreise entsteht, schaukelt sich, wie in Fig. 31 dargestellt ist, vom Punkte A , dem Augenblicke des Anfanges des Unterbrechungsvorganges an, einige Perioden hindurch hoch, wobei seine Amplitude so lange ansteigt, bis sie im Punkte B gleich groß und entgegengesetzt gerichtet ist, wie die gerade in diesem Augenblicke im Unterbrechungslichtbogen herrschende Gleichstromstärke J_g . Ist dies der Fall, so wird eine kurze Zeit hindurch die Stromstärke J' in dem Unterbrechungslichtbogen zu Null, und infolgedessen reißt dieser, wenn er keine zu große Ionisierungsträgheit besitzt, ab. Die nunmehr einsetzende langsame Entladung des Kondensators C_1 über die Selbstinduktion der Primärwicklung und die Batterie ist für die Energieübertragung nach dem Sekundärkreis ohne Bedeutung. Für die Aufladung des Sekundärkondensators kommt nur die plötzliche Unterbrechung

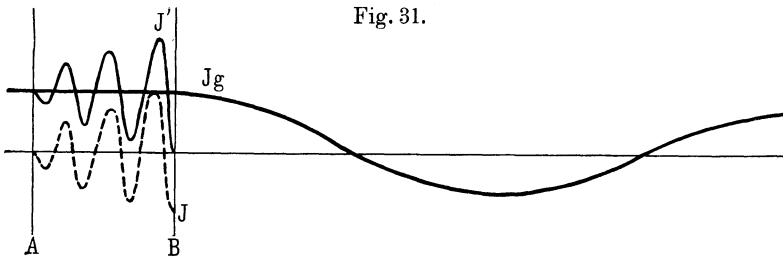


Fig. 31.

im Augenblicke B und die dadurch erzeugte Sekundärspannung in Frage. Nimmt man diese Erklärung des Unterbrechungsvorganges, bzw. der Wirkungsweise des sogenannten Löschkondensators als richtig an — und sie ist durch zahlreiche Versuche von Burstyn bewiesen worden —, so ergeben sich ohne weiteres folgende für die richtige Dimensionierung des Kondensators C_1 bzw. des zu ihm gehörigen Schwingungskreises maßgebenden Gesichtspunkte:

1. Die Unterbrechungsstelle A muß möglichst gute Löschwirkung besitzen, damit in dem Augenblicke B , in welchem der Lichtbogenstrom zu Null wird, auch wirklich der Strom abreißt. Diese Bedingung ist bei dem Durchschießen von Drähten, wie es nach den bisherigen Versuchen scheint (vgl. auch erstes Kapitel), im allgemeinen genügend erfüllt.

2. Die Schwingungsdauer des Löschkreises darf nicht zu kurz sein, denn je kleiner sie ist, um so kürzer ist auch die Zeit, während welcher der Lichtbogen in der Unterbrechungsstelle ab-

reißen muß, um so höhere Anforderungen muß man an deren Löschfähigkeit stellen. Ist diese, wie es ja im allgemeinen der Fall sein wird, gegeben, so kann man zeigen, daß z. B. ein Kondensator, welcher mit einigen Zentimetern Zuleitung noch gut löscht, versagt, wenn man ihn ganz kurz an die Unterbrechungsstelle anlegt. Es empfiehlt sich daher, wenn die Löschwirkung der Unterbrechungsstelle nicht ganz vorzüglich ist, und dies wird bei den ballistischen Auslösevorrichtungen wohl stets der Fall sein, eine eisenfreie Spule von mäßiger Selbstinduktion dem Kondensator C_1 vorzuschalten, so daß die Zeit, während deren der Strom Null bzw. nahezu Null ist, genügend groß wird. Andererseits ist natürlich eine zu große Schwingungsdauer des Löschkreises ebenso ungünstig, weil die Unterbrechung des Primärstromes dann nicht plötzlich genug erfolgt, so daß man im allgemeinen darauf angewiesen sein wird, die günstigsten Verhältnisse auszuprobieren. Einige Anhaltspunkte für die Dimensionierung des Löschkreises sind in der oben erwähnten Arbeit von Burstyn angegeben worden, jedoch kann hierauf im einzelnen nicht näher eingegangen werden, teils aus Raummangel, teils deswegen, weil die dort behandelten Anwendungen der Schaltung für andere Zwecke bestimmt sind.

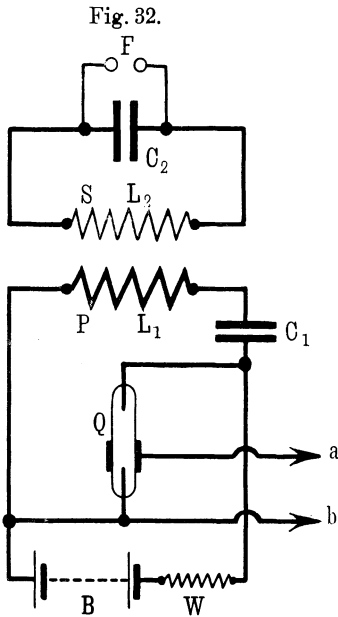
3. Endlich muß man noch dafür sorgen, daß die Dämpfung des Löschkreises möglichst klein ist, damit die Löschschrwingungen leicht entstehen und sich schnell auf den Wert des Gleichstromes hinaufschaukeln können. Auch mit Rücksicht hierauf ist es ungünstig, die Selbstinduktion des Löschkreises zu klein zu wählen, da man dann, wie bereits mehrfach erwähnt worden ist, eine zu starke Dämpfung, ja unter Umständen nur eine aperiodische Aufladung erhält.

Beachtet man die angegebenen Gesichtspunkte, so dürften in Zukunft die mit einem Induktor erhaltenen Resultate wohl auch günstiger werden, als es bei den bisherigen Versuchen der Fall gewesen ist.

Eine andere Schaltung, welche ebenfalls von Burstyn herrührt¹⁾ und in Fig. 32 dargestellt ist, arbeitet nicht mit der Unterbrechung des Primärstromes, sondern schiebt nur einen kurz dauernden Stromstoß durch die Primärwicklung des Induktors.

¹⁾ Allerdings ist sie von Burstyn nicht für Anwendung in der Ballistik bestimmt gewesen.

Die Anordnung und ihre Wirkungsweise ist folgende: Mit der Primärwicklung P ist ein Kondensator C_1 in Reihe geschaltet. Dieser wird von der Batterie B aus über die Wicklung P und einen Widerstand W aufgeladen. Parallel zu dem Kondensator und der Primärwicklung wird eine Quecksilberlampe Q geschaltet. Diese ist zunächst nichtleitend, kann aber durch Anlegen einer



Spannung an die beiden Punkte a und b gezündet werden. In dem Augenblick, in welchem diese Zündung erfolgt, entladet sich der Kondensator C_1 über die Primärwicklung und die Quecksilberlampe. Denkt man sich diese letztere durch einen Kurzschlußschalter ersetzt, so würden wir im allgemeinen eine oszillatorische Entladung erhalten. Im Gegensatz zu einem gewöhnlichen Schalter besitzt aber die Quecksilberlampe die Eigenschaft, daß sie nach erfolgter Zündung sofort wieder erlischt, wenn der sie durchfließende Strom auch nur für einen ganz kurzen Augenblick zu Null wird. Für den vorliegenden Fall bedeutet dies, daß, wenn die

oszillatorische Entladung des Kondensators C_1 zum erstenmal durch Null geht, der Strom unterbrochen wird, die Entladung also nicht weiter gehen kann. Die Folge davon ist, daß wir in der Primärwicklung des Induktors nur einen einzigen kurzen Stoß¹⁾, entsprechend $\lambda/2$ der entstehenden Schwingung, erhalten. Dieser Stromstoß erzeugt in der Sekundärwicklung S eine Spannung, welche zum Aufladen der Kapazität C_2 dient, die sich dann ihrerseits wieder über die Funkenstrecke F entlädt. Für die Energieübertragung erhält man die günstigsten Verhältnisse, wenn man die Kapazitäten C_1 und C_2 so dimensioniert, daß die Schwingungsdauern des Primär- und des Sekundärkreises übereinstimmen,

¹⁾ Der Vorgang ist ähnlich demjenigen bei der sogenannten Stoß-
erregung in der Hochfrequenztechnik.

daß also $L_1 C_1 = L_2 C_2$ ist. Wären beide Kreise vollkommen verlustlos, so würde der Primär- und der Sekundärstrom eine Phasenverschiebung von 180° haben, ihre magnetische Wirkung sich also bei gleicher Amperewindungszahl primär und sekundär gerade aufheben. Dies bedeutet aber wiederum, daß die Wirkung der beiden Selbstinduktionen L_1 und L_2 zu Null gemacht wird. Praktisch kann natürlich dieser Fall nicht eintreten, da infolge der Verluste die Phasenverschiebung zwischen den beiden Strömen kleiner als 180° ist. Jedenfalls wird man aber bei gleichen Amperewindungszahlen primär und sekundär doch eine beträchtliche Herabminderung der Selbstinduktionen L_1 und L_2 erhalten. Dies ist für die bei dieser Anordnung entstehende Verzögerung zwischen dem Augenblick der Zündung der Quecksilberlampe und dem Einsetzen des Beleuchtungsfunkens in F von wesentlicher Bedeutung. Die Verzögerung ist nämlich stets gleich $\lambda/2$ der primär entstehenden Schwingung. Nehmen wir nun, um genügende Energiemengen in den primären Entladungsstoß hineinzubringen, eine große Kapazität C_1 (mehrere Mikrofarad), so würde, wenn die volle Selbstinduktion der Primärwicklung wirksam wäre, die Verzögerung sehr groß und damit für viele ballistische Zwecke unbrauchbar werden. Bei richtig dimensionierten Spulen und möglichst verlustlosem Eisen¹⁾ wird jedoch die primäre Selbstinduktion recht klein, so daß sich auch bei großen Kapazitäten C_1 noch für die Ballistik geeignete, nicht allzu große Verzögerungen ergeben. Gewisse Schwierigkeiten bietet bei dieser Anordnung die Art der Zündung der Quecksilberlampe. Im allgemeinen wird diese Zündung mittels eines kleinen Induktors ausgeführt, dessen Primärwicklung z. B., wie es früher angegeben war, durch das Geschoß zerrissen werden kann. Hierbei erhält man aber, wie zahlreiche Versuche gezeigt haben, nur wenig konstante Verzögerungen (vgl. das beim Induktor Gesagte), so daß damit der Hauptvorteil der Burstynschen Schaltung gegenüber der gewöhnlichen Betriebsweise eines Induktors wieder zunichte gemacht wird. Diesen Nachteil könnte man jedoch dadurch beseitigen, daß man zur Zündung der Quecksilberlampe nicht einen besonderen kleinen Zündinduktor benutzt, sondern eine hohe Spannung,

¹⁾ Am besten eignet sich hierfür das in der Hochfrequenztechnik verwendete äußerst dünne Eisenblech von etwa 0,03 mm Dicke.

etwa geliefert von einer Influenzmaschine oder einer aufgeladenen Kapazität, verwendet, welche durch das Geschoß für einen kleinen Augenblick an die Zündelektrode der Lampe angelegt wird. In dieser Form dürfte die Anordnung eine sehr konstante Verzögerung geben, was gegenüber der früher beschriebenen Induktorschaltung einen nicht zu unterschätzenden Vorzug bedeuten würde. Ob es allerdings gelingen wird, die in dem einen Entladungsstoß umgesetzte Energie genügend groß zu machen, um helle Beleuchtungsfunken F zu erhalten, ist, solange nicht weitere Versuche hierüber vorliegen, nicht ohne weiteres zu sagen. Aber sieht man auch von der Verwendung des Induktors zur direkten Erzeugung von Beleuchtungsfunken ab, so scheint mir die Schaltung doch von besonderer Wichtigkeit für Auslösezwecke¹⁾ in der Anordnung von Majorana und Fontana zu sein, da sie, wie bereits mehrfach hervorgehoben wurde, eine große Konstanz in den erzeugten Verzögerungen gewährleistet, was bei der Majorana-Fontana-schen Methode in der bisherigen Ausführung nicht der Fall war.

Der Vollständigkeit halber soll zum Schluß noch darauf hingewiesen werden, daß man auch bei Anwendung des Induktors zur Herstellung von Verzögerungen in bezug auf die Schaltung der Beleuchtungsfunkenstrecke, welche parallel zu dem Sekundärkondensator liegt, alle diejenigen Gesichtspunkte beachten muß, auf welche bereits bei den anderen Methoden aufmerksam gemacht worden ist. Vor allem ist es erforderlich, die Zuleitungen von der Kapazität zur Funkenstrecke so kurz als möglich zu machen. Auch die Einschaltung geeigneter Löschfunkenstrecken kann, insbesondere bei größeren Energiemengen, von Vorteil sein. Die Länge der Beleuchtungsfunkenstrecke muß auf den maximal möglichen Wert eingestellt werden, um Partialentladungen zu vermeiden. Beachtet man diese Regeln nicht, so wird die Dauer des Beleuchtungsfunkens leicht zu groß und man erhält unscharfe Bilder.

¹⁾ Insbesondere für die Auslösung großer Energiemengen, also als Zündschaltung, wie sie bei den Methoden der Vorderbeleuchtungs kinematographie (vgl. fünftes Kapitel) verwendet werden, dürfte die Methode von Vorteil sein. Hierbei kommt dann natürlich der Sekundärkondensator C_2 in Fortfall.

Drittes Kapitel.

Die Beleuchtungsfunkenstrecken.

In dem vorhergehenden Kapitel waren lediglich die Gesichtspunkte besprochen worden, welche sich für die Behandlung bzw. Einstellung der Beleuchtungsfunkenstrecken auf Grund der elektrischen Vorgänge der betreffenden Schaltungsanordnungen ergeben. Die rein konstruktive Ausführung dieser theoretischen Erfordernisse dagegen wird in diesem Kapitel behandelt.

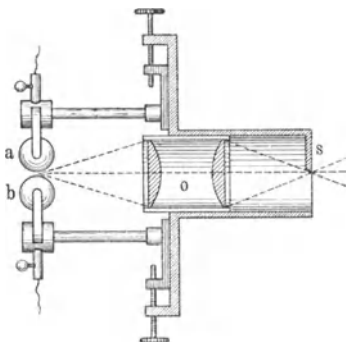
Je nach der Verwendung der Beleuchtungsfunkenstrecken können wir drei Gruppen unterscheiden:

1. Beleuchtungsfunkenstrecken für Einfachfunkenphotographie,
2. für Mehrfachfunkenphotographie,
3. für Funkenphotographie in Verbindung mit einer Schlierenmethode.

Die Beleuchtungsfunkenstrecken für die erste Gruppe bieten konstruktiv nur geringe Schwierigkeiten, da bei ihnen keine nennenswerten Beanspruchungen auftreten, auch wenn in einem Funken eine verhältnismäßig große Energiemenge umgesetzt wird, wie es z. B. bei der Funkenphotographie mit Vorderbeleuchtung (vgl. Fünftes Kapitel) der Fall ist. Hier wird es im wesentlichen darauf ankommen, ein möglichst sicheres Einsetzen der Funkenstrecke, d. h. ohne Entladeverzug, zu erzielen. Da sich die bei physikalischen Untersuchungen übliche Belichtung der Funkenstrecke mit Rücksicht darauf verbietet, daß die Mehrzahl aller ballistischen Aufnahmen im verdunkelten Zimmer ausgeführt werden muß, so verwendet man zweckmäßig Elektroden mit möglichst scharfen Spitzen, bei welchen der Entladeverzug gering ist. Kupfer hat sich hierfür im allgemeinen gut bewährt. Die Verwendung von Magnesium, welches im Funkenspektrum intensive Linien im äußersten Violett und im Ultraviolett besitzt und deswegen photographisch besonders wirksam ist, hat nur dann einen Zweck, wenn man entweder mit Quarzlinsen oder, wie z. B. bei der Schattenschlierenmethode, überhaupt ohne Linsen arbeitet. Andernfalls bietet das Magnesium nach den bisherigen Erfahrungen wenig Vorteile, eher Nachteile gegenüber Kupfer, besonders bei hohen

Funkenfrequenzen¹⁾. Will man nun mit derartigen Funkenstrecken scharfe Geschoßbilder erzielen, so genügt es, wie zahlreiche Versuche gezeigt haben, nicht, nur die früher im zweiten Kapitel angegebenen Maßregeln zu berücksichtigen, sondern man muß vor allem darauf achten, daß lediglich die Funkenbahn als Lichtquelle wirksam ist, während die Elektroden am besten vollkommen abgedeckt werden. Es tritt nämlich an diesen eine Art Glimmlicht auf, welches photographisch stark wirksam ist und offenbar erheblich länger andauert, vielleicht auch früher einsetzt als der eigentliche Funke, so daß man stets bei Außerachtlassen dieser Vorsichtsmaßregel unscharfe Bilder erhält. Diese Tatsache hat bereits Mach²⁾ bei seinen ersten funkenphotographischen Versuchen beob-

Fig. 33.



achtet und durch Abdeckung unschädlich gemacht. Auch Töpler hat gelegentlich seiner Schlierenbeobachtungen Störungen durch das von den Elektroden ausgehende Licht erhalten³⁾ und diesen Fehler mittels einer geeigneten optischen Anordnung beseitigt. Da diese auch für viele andere Zwecke der Funkenphotographie von Wert sein kann, möge sie hier kurz geschildert werden. Fig. 33 stellt sie in der Töplerschen Ausführung

dar. Die Funkenstrecke ab wird durch ein Linsensystem o von kurzer Brennweite und möglichst großem Öffnungsverhältnis auf der Blende s abgebildet. Durch mikrometrische Einstellung der Funkenstrecke oder auch durch Verschieben der Blende s kann man es erreichen, daß das Bild der unteren Kugel vollständig abgedeckt wird. Ist die Funkenstrecke genügend lang, so kann man durch Anbringung einer zweiten Blende in der unteren Hälfte des Rohres m' auch die andere Elektrode abbilden.

¹⁾ Vgl. die Ausführungen weiter unten.

²⁾ E. u. L. Mach, a. a. O.; vgl. a. Cranz, Lehrbuch der Ballistik 3, 242. Verlag B. G. Teubner, Leipzig-Berlin, 1913.

³⁾ Allerdings handelte es sich dabei wohl mehr um das von seinen Kugelelektroden reflektierte Licht, welches eine störende Aufhellung des Gesichtsfeldes herbeiführte, da er keine photographischen Aufnahmen hergestellt hat.

Anderenfalls muß man dies an dem Aufnahmeobjektiv des photographischen Apparates, auf welchem im allgemeinen ein vergrößertes Bild der Funkenstrecke entsteht, tun. Praktisch wird es jedoch meist keine Schwierigkeiten bereiten, auch die Abbildung der zweiten Elektrode in dem ersten Bilde auszuführen. Dieses optische Verfahren hat den Vorteil, daß man auch die Ansatzpunkte der Funkenbahn, an denen ebenfalls störendes Glimmlicht auftritt, mit abblenden kann, was bei einer direkten Abbildung an der Funkenstrecke selbst nicht möglich ist. Allerdings verliert man bei dieser Methode etwas Licht, jedoch ist dies, wenigstens in der Einfachfunkenphotographie nicht von wesentlicher Bedeutung, da man dort meist ausreichend Licht zur Verfügung hat¹⁾.

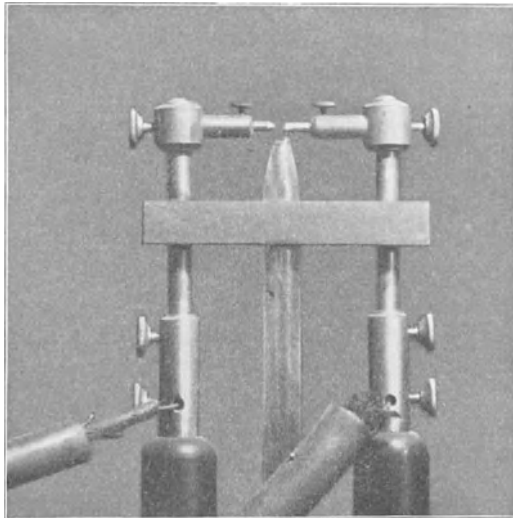
Schwieriger gestaltet sich der Bau von Funkenstrecken für die Mehrfachfunkenphotographie. Bei diesen werden ziemlich erhebliche Leistungen, bis zu mehreren Kilowatt, in Beleuchtungsenergie umgesetzt. Die Folge davon ist, abgesehen von der rein mechanischen Abnutzung der Elektroden, daß in die Funkenbahn große Mengen Metaldampf hineingelangen, welche eine starke Ionisierung und damit auch eine erhebliche Trägheit der Funkenstrecke nach sich ziehen. Die einzelnen schnell aufeinander folgenden Funken sind dann nicht mehr scharf getrennt, sondern beginnen unter Lichtbogenbildung ineinander überzugehen. In diesem Falle ist es natürlich nicht mehr möglich, scharfe Teilbilder zu erhalten. Um diese Metaldämpfe zu beseitigen, muß man, wie dies Cranz getan hat, einen kräftigen Luftstrahl gegen die Funkenstrecke blasen (Fig. 34). Sind die umzusetzenden Energiemengen größer, so genügt auch dieses Mittel allein nicht; vielmehr ist man dann gezwungen, um eine zu starke Erwärmung der Elektroden zu verhindern, diese noch künstlich durch hindurchfließendes Wasser zu kühlen²⁾. Für die meisten Zwecke genügt jedoch die Anwendung eines kräftigen Gebläses. Eine derartige Funkenstrecke in der Cranzschen Konstruktion ist in Fig. 34 wiedergegeben. Einen weiteren Vorteil erreicht man durch die Benutzung des Gebläses dabei noch insofern, als auch die Funkenspannung

1) Im übrigen können die zweckmäßigsten optischen Anordnungen, welche bei ballistischen Versuchen Verwendung finden, nicht näher behandelt werden, weil dies über den Rahmen des Buches hinausgeht.

2) Vgl. die Funkenstrecke von Fessenden, Zenneck, Leitf. d. drahtl. Telegr. 1909, S. 184. Verlag von F. Enke, Stuttgart.

infolge der Beseitigung der Metaldämpfe erhöht und damit die Helligkeit der Funken gesteigert wird, was bei der Vielfachfunkenphotographie mit sehr hohen Funkenfrequenzen, bis zu 100 000, von besonderer Bedeutung ist. Allerdings wird durch dieses Anblasen mit Luft die elektrische Löschwirkung der Funkenstrecke nicht verbessert¹⁾. Dies ist nur der Fall, wenn man statt Luft Wasserstoff zum Anblasen verwendet, wie dies ebenfalls von Cranz bei einigen Versuchen geschehen ist. Man erhält dann sehr scharfe Teilbilder, jedoch tritt gleichzeitig eine erhebliche

Fig. 34.



Herabminderung der Helligkeit der Funken ein. Da sich nun bei zahlreichen Versuchen gezeigt hat, daß die Bildschärfe genügend ist, wenn man nur einen hinreichend kräftigen Luftstrom anwendet, so ist neuerdings stets auf die Anwendung von Wasserstoff verzichtet worden. Offenbar ist also bei derartigen Funkenstrecken weniger die Löschfähigkeit im Sinne der Hochfrequenztechnik maßgebend als vielmehr die verhältnismäßig langdauernde Trägheit, welche durch die in Form von Dämpfen in der Funkenbahn befindlichen Metallteilchen hervorgerufen wird.

¹⁾ Br. Glatzel, *Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Teleph.* **2**, 90 (1908); H. Rau, ebenda **4**, 56 (1911).

Im Zusammenhang hiermit ist es auch von Bedeutung, Metalle zu verwenden, welche eine möglichst große Funkendämpfung ergeben. Die einzigen genaueren Untersuchungen, welche hierüber vorliegen und einen Vergleich zulassen, sind im Jahre 1910 von M. Wien¹⁾ veröffentlicht worden. Die Resultate dieser Untersuchungen gibt die Tabelle wieder. Da die Dekremente δ für die verschiedenen Metalle unter gleichen Betriebsverhältnissen ermittelt sind, so ist ein Vergleich derselben möglich.

	δ		δ
Magnesium	0,059	Zink	0,071
Wismut	0,062	Platin	0,084
Cadmium	0,065	Kupfer	0,090
Antimon	0,071	Silber	0,116

Man sieht, daß Kupfer und Silber die stärkste Funkendämpfung besitzen, eine Tatsache, welche durch die praktischen Erfahrungen in der Funkenphotographie durchaus bestätigt worden ist. Hiernach empfiehlt es sich also z. B. nicht, für hohe Funkenfrequenzen Magnesium zu verwenden, da dieses Metall eine sehr viel geringere Funkendämpfung besitzt und infolgedessen leicht unscharfe Bilder entstehen können.

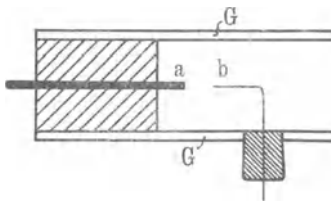
Verwendet man die Funkenphotographie in Verbindung mit einer Schlierenmethode, so muß man mit Rücksicht auf deren Erfordernisse besondere Konstruktionen der Beleuchtungsfunkenstrecken anwenden, welche von den oben angegebenen etwas abweichen. Bei der Töplerschen Schlierenmethode wird das Bild der Funkenstrecke auf dem Objektiv des Aufnahme- bzw. Beobachtungsapparates entworfen und dann durch eine besondere „Schlierenblende“ abgeblendet. Die genaue Abblendung des direkten Funkenlichtes, von welcher vor allem die Güte des Schlierenbildes abhängt, wird natürlich sehr schwierig, wenn der Beleuchtungsfunke nicht stets an der gleichen Stelle überspringt, sondern dauernd seine Bahn verändert, wie dies z. B. bei längeren Funken, welche frei in der Luft übergehen, fast stets der Fall ist. Um dieses Hin- und Herspringen des Funkens zu verhindern, kann man, wie es auch schon Mach getan hat, drahtförmig aus-

¹⁾ M. Wien, Phys. Zeitschr. 11, 282 (1910).

gebildete Elektroden in eine Hartgummirille einbetten, welche mit einer Glimmerscheibe überdeckt ist. Dieses Verfahren hat aber den großen Nachteil, daß man ziemlich viel Licht verliert und auch die Hartgummirille sehr bald zerstört wird, insbesondere wenn größere Energiemengen benutzt werden. Besser bewährt hat sich für diesen Zweck eine Anordnung von Gretsch, welcher den Funken in einem engen Glas- oder Quarzrohr überspringen läßt.

Während man nun bei der Töplerschen Schlierenmethode geradlinige Funken verwenden kann, muß man sich für die Schattenschlierenmethode nach Dvořák und Boys möglichst punktförmige Lichtquellen herstellen. Am besten erreicht man dies dadurch, daß man die Funkenbahn in die Beleuchtungsrichtung einstellt und nicht senkrecht dazu wie bei der Töplerschen Methode. In diesem Falle muß man aber dafür sorgen, daß die eine

Fig. 35.



nunmehr vorn liegende Elektrode nicht zu starken Schatten wirft, d. h. man muß sie aus möglichst dünnem Draht herstellen. Fig. 35 zeigt eine derartige Funkenstrecke, wie sie von Töpler und später auch von Foley und Souder in den bereits früher erwähnten Arbeiten angewendet worden ist. Bei ihrer Anordnung befindet sich die Funkenstrecke *ab* innerhalb eines zylindrischen Glasrohres *G* von etwa 7 mm Durchmesser, wodurch nach Angabe der letztgenannten Forscher eine bessere Lichtausbeute infolge Ausnutzung der an der Glaswandung reflektierten Lichtstrahlen erzielt werden soll. Ob dies wirklich der Fall ist, möchte ich dahingestellt sein lassen, um so mehr, als man in dieser Hinsicht durch geeignete optische Hilfsmittel jedenfalls erheblich bessere Erfolge erzielen kann.

Viertes Kapitel.

Die Mehrfachfunkenphotographie.

(Funckenkinematographie.)

In der Einleitung ist bereits kurz auf die Bedeutung der Mehrfachfunkenphotographie für kinematographische Aufnahmen schnell verlaufender Vorgänge hingewiesen worden. Derartige Auf-

nahmen können infolge der gleichen mechanischen Schwierigkeiten in bezug auf schnelle Bewegung von Momentverschlüssen ebenso wie bei der Einfachfunckenphotographie nur bis zu einer gewissen Grenze der Bildfrequenz mit Dauerbeleuchtung und von da ab nur noch mit diskontinuierlicher Beleuchtung, d. h. also durch eine Reihe von mehr oder minder schnell aufeinander folgenden Einzelfuncken hergestellt werden¹⁾.

Die ersten Anfänge einer Funckenkinematographie stellen die im Jahre 1900 von C. Cranz und K. R. Koch²⁾ angefertigten Serienaufnahmen über Durchschießungsvorgänge verschiedenster Art dar. Die Aufnahmen wurden in der Weise hergestellt, daß durch allmähliches Entfernen der Auslösevorrichtung (Durchschießen einer beiderseits mit Stanniol beklebten Isolierplatte) von dem zu durchschießenden Körper bei jedem folgenden Schuß spätere Momente des Vorganges, und zwar jeder mit Hilfe eines einzelnen Beleuchtungsfunckens, photographisch festgehalten wurden. Aus diesen Einzelaufnahmen stellten dann Cranz und Koch kinematographische Serien zusammen. Ein Jahr später, 1901, wandte Cranz³⁾ die Funckenphotographie auf die Prüfung von automatischen Waffen an und erzeugte ebenfalls derartige Serien, welche das Arbeiten des Verschußmechanismus der Selbstlade-pistole erkennen ließen. Der Mangel dieses Verfahrens besteht darin, daß für jedes Teilbild ein besonderer Schuß notwendig ist. Auch gibt die aus derartigen Teilbildern zusammengestellte Serie nur ein annähernd richtiges Bild des Vorganges, da kaum anzunehmen ist, daß verschiedene Schüsse in allen Einzelheiten genau übereinstimmen. Wenn man aber auch hiervon absieht, so versagt das Verfahren doch vollständig, wenn es sich z. B. darum handelt, Durchschießungen von Knochen, Explosionsvorgänge usw. zu untersuchen, da man hier nicht gut mit mehreren Schüssen nacheinander arbeiten kann. Man mußte sich also bemühen, Methoden aus-

¹⁾ Über die Leistungen kinematographischer Apparate, welche mit kontinuierlicher Beleuchtung und Momentverschlüssen arbeiten, vgl. C. Cranz, Lehrbuch der Ballistik III, S. 295 (1913) und H. Lehmann, Die Kinematographie, ihre Grundlagen und ihre Anwendungen. B. G. Teubner, Aus Natur und Geisteswelt 358 (1911).

²⁾ C. Cranz u. K. R. Koch, Ann. d. Phys. (4) 3, 247 (1900).

³⁾ Anwendung der elektrischen Momentphotographie auf die Untersuchung von Schußwaffen. Verlag Knapp, Halle a. S. 1901.

findig zu machen, welche es gestatteten, die verschiedenen Stadien eines einzigen Schusses, z. B. auf einem bewegten Film, photographisch festzuhalten. Das erste hierfür geeignete Verfahren rührt von Kranzfelder und Schwinning¹⁾ her, denen es im Jahre 1903 gelang, zehn aufeinander folgende Aufnahmen eines und desselben Schußvorganges herzustellen. Da nun die Schwinningsche Methode für bestimmte Zwecke, hauptsächlich wegen ihrer großen Einfachheit und Betriebssicherheit, auch heute noch angewendet wird, wollen wir etwas näher auf sie eingehen.

a) Die Vielfachfunkenanordnung von Schwinning.

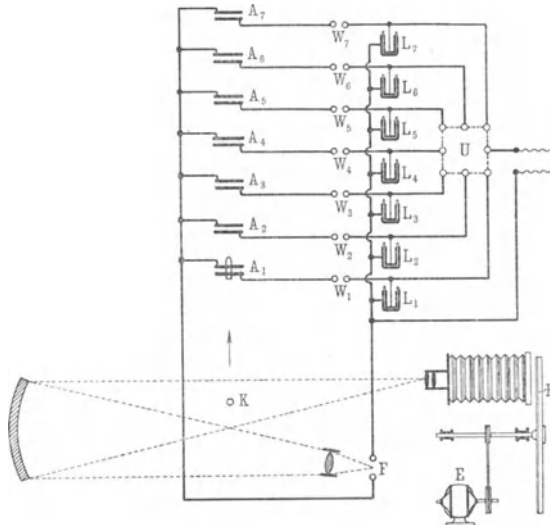
Die Schwinningsche Versuchsanordnung ist schematisch in Fig. 36 wiedergegeben, und zwar in der ersten Ausführung, welche lediglich dazu bestimmt war, Durchschießungen von Knochen, Weichteilen usw. zu untersuchen²⁾. $L_1 L_2 L_3 \dots L_7$ sind Leidener Flaschen, deren äußere Belegungen miteinander und dem einen Pol der Beleuchtungsfunkenstrecke F verbunden sind. Die inneren Belegungen der Flaschen sind über kurze Hilfsfunkenstrecken $W_1 W_2 W_3 \dots W_7$, zu je einem Pol der Auslösevorrichtungen $A_1 A_2 A_3 \dots A_7$ (z. B. beiderseitig mit Stanniol beklebte Paraffinplatten) geführt. Die anderen Pole der Auslösevorrichtungen sind miteinander und dem zweiten Pol der Beleuchtungsfunkenstrecke F verbunden. Gleichzeitig sind aber die inneren Belegungen der Leidener Flaschen noch zu einer Schaltvorrichtung U geführt, durch welche sie zunächst zum Zweck der Aufladung durch eine Influenzmaschine sämtlich verbunden werden, so daß während der Ladung alle Flaschen parallel liegen. Diese Schaltvorrichtung U wird kurz vor dem Schuß geöffnet. Der zu durchschießende Knochen befindet sich an der Stelle K innerhalb des Lichtkegels der Beleuchtungsfunkenstrecke F . Die Flugrichtung des Geschosses ist durch einen Pfeil angedeutet. Das Geschöß durchschlägt also zunächst den Knochen und dann der Reihe nach die aufeinander folgenden Auslösevorrichtungen A . Wenn nun die beiden

¹⁾ Kranzfelder u. Schwinning, Die Funkenphotographie, insbesondere die Mehrfachfunkenphotographie. Berlin 1903.

²⁾ Kranzfelder u. Schwinning, Die Funkenphotographie, insbesondere die Mehrfachfunkenphotographie in ihrer Verwendbarkeit zur Darstellung der Geschößwirkung im menschlichen Körper. Herausg. v. d. Med.-Abt. d. Kgl. Preuß. Kriegsministeriums. Berlin 1903.

Belegungen von A_1 durch das Geschoß verbunden werden, so entladet sich die Flasche L_1 über die Hilfsfunkenstrecke W_1 und die Beleuchtungsfunkenstrecke F . Beim Betätigen der Auslösevorrichtung A_2 entladet sich L_2 und erzeugt einen zweiten Beleuchtungsfunken. In dieser Weise geht es fort, bis sämtliche Flaschen entladen sind. Die Hilfsfunkenstrecken W sind erforderlich, weil es vorkommen kann, daß durch mitgerissene Stanniolstückchen die bereits betätigten Auslösevorrichtungen geschlossen bleiben und dann die Entladung der nächsten Flasche nicht über die Beleuch-

Fig. 36.



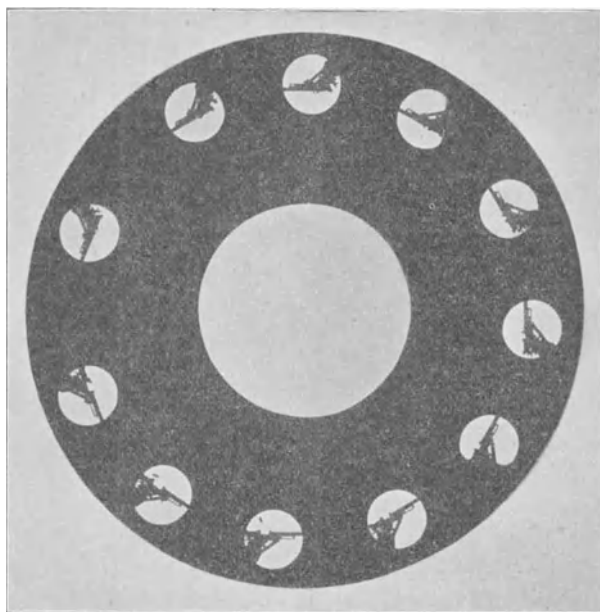
tungsfunkenstrecke F , sondern in die vorher entladenen Flaschen erfolgt. Das Schwinningsche Verfahren gestattet, bei großer Geschoßgeschwindigkeit die verschiedenen Beleuchtungsfunken in sehr kurzen Zeitabständen aufeinander folgen zu lassen. Ihre Zahl ist lediglich abhängig von der Zahl der verwendeten Leidener Flaschen und Auslösevorrichtungen. Das gleiche Verfahren in Verbindung mit einer Funkenstreckenauslösung ist dann später noch einmal von Schatte¹⁾ beschrieben worden.

Wir müssen nun einige Worte der photographischen Einrichtung widmen. Es ist ohne weiteres klar, daß wir jetzt nicht

¹⁾ J. Schatte, Kriegstechn. Zeitschr. 1910, Heft 2 u. 3.

mehr wie bei den Einzelaufnahmen eine ruhende photographische Platte verwenden dürfen, da sich sonst die von den einzelnen Funken erzeugten Teilbilder überlagern würden, sondern einen bewegten Film, welcher so schnell durch die Bildebene der photographischen Kamera C geführt wird, daß die einzelnen Bilder neben einander auf dem Film entstehen. Konstruktiv wurde diese Aufgabe von Schwinning in der Weise gelöst, daß er eine kreisförmige Stahlscheibe R , auf welcher ein Filmbblatt befestigt

Fig. 37.



war, durch einen Elektromotor E mit der ja ohne weiteres aus der Geschößbewegung berechenbaren gewünschten Geschwindigkeit durch das Bildfeld rotieren ließ. Trotz dieser schnellen Bewegung des Films werden aber die einzelnen Teilbilder doch vollkommen scharf, da die Momentbelichtung durch den elektrischen Funken, bei geeigneter Dimensionierung der Funkenstrecke und der sich entladenden Kapazitäten, so außerordentlich kurz ist, daß eine Fortbewegung des Films während der Zeit der Belichtung im Bilde nicht erkennbar ist. Eine auf diese Weise erhaltene Serienaufnahme der Arbeitsweise des Verschlußmechanismus einer Selbst-

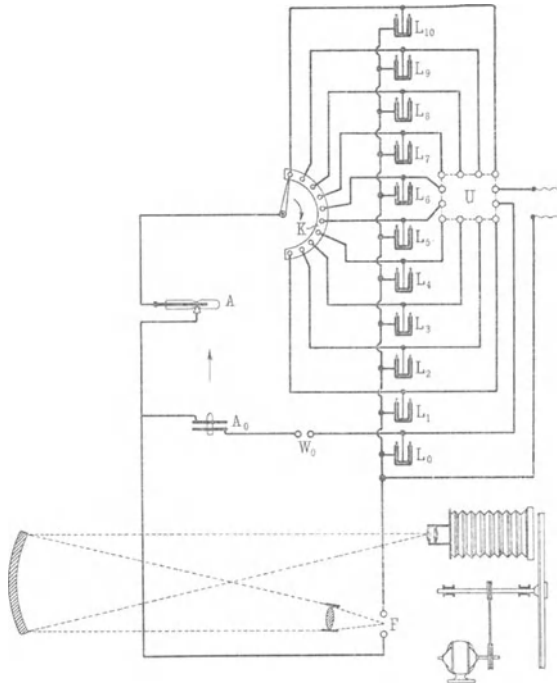
ladepistole ist in Fig. 37 dargestellt. Diese Schwinningsche Filmanordnung hat gegenüber der Anwendung von Filmbändern, wie sie z. B. bei dem ballistischen Kinematographen von Cranz (s. d.) benutzt werden, den Vorteil, daß das jeweils belichtete Filmstück vollkommen eben in der Bildebene liegt, was gerade bei den neuerdings zur Verwendung gelangenden lichtstarken Objektiven mit großem Öffnungsverhältnis von Bedeutung ist. Andererseits hat aber die Anordnung auch einen großen Nachteil insofern, als man mit der Zahl der Teilbilder ziemlich beschränkt ist, da bei der erforderlichen großen Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe R ihr Durchmesser nicht zu sehr vergrößert werden darf¹⁾ und es mithin nicht möglich ist, wie z. B. bei der Cranzschen Anordnung, bis zu 800 Teilbilder desselben Vorganges herzustellen. Später, im Jahre 1909, hat dann Schwinning, um von der Geschößbewegung selbst unabhängig zu sein, die Anordnung der Fig. 36 in der Weise abgeändert, daß er die aufeinander folgenden Entladungen der einzelnen Leidener Flaschen durch einen schnell rotierenden mechanischen Schalter herbeiführte. Die hierbei sich ergebende Anordnung²⁾ ist in Fig. 38 schematisch dargestellt. K ist eine feststehende Hartgummischeibe, auf welcher im Kreise zehn Kontakte angebracht sind, welche mit den inneren Belegungen der einzelnen Leidener Flaschen in Verbindung stehen. Vor diesen Kontakten rotiert in kleinem Abstände, ebenfalls auf einer Hartgummischeibe befestigt, ein Platinstreifen, welcher unter Zwischenschaltung einer Auslösevorrichtung A mit dem einen Pol der Beleuchtungsfunkkenstrecke verbunden ist, deren anderer Pol wiederum an die sämtlichen äußeren Belegungen der Flaschen L angeschlossen wird. Durch geeignete Wahl der Umdrehungsgeschwindigkeit des rotierenden Kontaktes können die gewünschten Zeitabstände zwischen den einzelnen Beleuchtungsfunkken eingestellt werden. Während nun bei der ersten Anordnung der Beginn der Funkkenserie zwangsläufig durch die Geschößbewegung festgelegt war, ist dies zunächst bei dieser zweiten Anordnung nicht der Fall. Vielmehr würden sich die Flaschen sofort nach Öffnen der Schaltvorrichtung U entladen, bevor der Schuß gefallen ist. Um dies zu verhindern, ist noch die Auslöse-

¹⁾ Schwinning verwendete Umfangsgeschwindigkeiten bis zu 120 m/Sek.

²⁾ W. Schwinning, Zeitschr. f. d. ges. Schieß- u. Sprengstoffwesen 4, 5, 26, 52 (1909).

vorrichtung A in die gemeinsame Leitung zur Beleuchtungsfunk-
strecke eingeschaltet. Diese, z. B. in Form einer Glasröhrena-
lösung, verhindert so lange das Einsetzen der Entladungen, bis
das Geschöß das Glasrohr zertrümmert und dadurch den Strom-
kreis geschlossen hat. Da aber bei derartigen Auslösungen stets
Verzögerungen, wenn auch geringe, auftreten und man infolge-
dessen den Zeitmoment des Beginnes der Aufnahme nicht genau

Fig. 38.



festlegen kann, wenn man nicht gerade das Geschöß selbst photo-
graphiert, so hat Schwinning noch einen besonderen Zeit-
markierungsstromkreis mit Hilfe der Flasche L_0 und der Auslöse-
vorrichtung A_0 angewendet, welcher den Beginn der Aufnahme
aus dem Abstand von A_0 bis zur Mündung und der bekannten
Geschößgeschwindigkeit zu ermitteln gestattet.

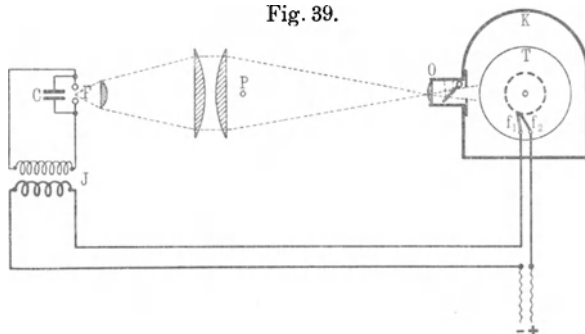
Die hier geschilderte zweite Schwinning'sche Methode, mit
welcher sich Funkenfrequenzen bis zu 5000, d. h. also Teilbilder
im Abstände von $\frac{1}{5000}$ Sek., ohne Schwierigkeit erzielen lassen,

wird noch jetzt für einfache Waffenuntersuchungen verwendet und hat sich dabei recht gut bewährt. Sie besitzt vor allem den Vorzug, daß sie mit verhältnismäßig geringen experimentellen Mitteln arbeitet und in ihrer ganzen Anordnung sehr übersichtlich und einfach ist.

b) Die Mehrfachfunkenphotographie nach Bull-Marey.

Die Schwinningsche Methode hatte neben ihren Vorzügen den Mangel, daß die Zahl der Teilbilder und damit auch ihr Anwendungsgebiet beschränkt war. In dieser Hinsicht verbessert war ein Verfahren, welches im Jahre 1904 von L. Bull¹⁾ ausgearbeitet worden ist und zwar auf Anregung von Marey, der

Fig. 39.



bereits früher Versuche unternommen hatte, um mit Hilfe von elektrischen Funken Bewegungen, wie den Insektenflug und ähnliches durch photographische Aufnahmen zu analysieren. Dieses Verfahren gestattet bei einer Funkenfrequenz von 2000 eine kinematographische Reihe von 40 bis 50 Bildern des zu untersuchenden Vorganges auf einem um eine Trommel gelegten Film aufzunehmen. Schematisch ist die Anordnung in Fig. 39 dargestellt. In einem lichtdichten Kasten *K*, der vorn ein Objektiv *O* trägt, befindet sich eine Trommel *T*, welche von einem Motor in schnelle Bewegung versetzt, und auf welche der lichtempfindliche Film aufgelegt wird. Auf der Trommelachse ist ferner eine Unterbrecherscheibe mit 50 voneinander isolierten Lamellen angebracht, auf

¹⁾ L. Bull, *Compt. rend.* **138**, 755 (1904); *Travaux de l'Association de l'Institut Marey* **2**, 51, (1910). Paris Masson u. Co., Editeurs. Vgl. auch I. Athanasiu, *ebenda* **1**, 120 (1905).

der zwei Federn f_1 und f_2 schleifen. Diese sind in den Primärstromkreis eines Induktoriums J eingeschaltet und unterbrechen den Strom in rascher Aufeinanderfolge, so daß man in der Beleuchtungsfunkenstrecke F , welche parallel zu einem an die Sekundärwicklung des Induktors angeschlossenen Kondensator C liegt, bei richtiger Dimensionierung (vgl. zweites Kapitel) eine entsprechende Funkenzahl erhält. Die Beleuchtungsfunkenstrecke ihrerseits erzeugt bei geeigneter optischer Anordnung auf dem rotierenden Film Schattenbilder des sich an der Stelle P abspielenden Vorganges. Die Funksstrecke ist hier ebenfalls so ausgebildet, daß die Dauer eines Funkens sehr klein gegenüber der Filmbewegung ist, der Film also praktisch während der Aufnahme stillsteht. An dem Objektiv ist noch ein Momentverschluß angebracht, welcher elektromagnetisch betätigt wird und dafür sorgt, daß der Film nur während einer Umdrehung belichtet wird. Die Auslösung des Momentverschlusses, d. h. also der Beginn der Aufnahme, kann entweder auf mechanischem Wege oder durch elektrische Kontakte richtig bewirkt werden.

Diese verhältnismäßig primitive Anordnung zur Erzeugung von Funkenserien hat natürlich zunächst alle diejenigen Mängel, welche dem einfachen Induktorbetrieb anhaften und die im zweiten Kapitel eingehend besprochen worden sind. Insbesondere ist es nur schwer möglich, genügende Energiemengen in die Beleuchtungsfunken hineinzubringen, da bei zu großen Stromstärken und Spannungen — Bull verwendete etwa 2,5 Amp. bei 50 Volt — an der Unterbrecherscheibe keine exakten Unterbrechungen mehr zu erzielen sind. Durch Parallelschaltung geeignet dimensionierter Kondensatoren läßt sich dieser Mangel allerdings bis zu einem gewissen Grade beseitigen, immerhin dürfte es aber kaum möglich sein, Energiemengen von auch nur 1 Kilowatt in Beleuchtungsenergie umzusetzen, besonders mit Rücksicht auf den sehr schlechten Wirkungsgrad des Induktors. Bessere Erfolge verspräche hier vielleicht die Anwendung des Burstynschen Verfahrens, wobei dann die Unterbrecherscheibe lediglich die Aufgabe hätte, die Zündung der Quecksilberlampe in schneller Aufeinanderfolge zu bewirken. Da die hierzu erforderliche Energiemenge sehr gering ist, so bietet die Konstruktion einer geeigneten Kontaktscheibe kaum nennenswerte Schwierigkeiten. Ob es aber einen Zweck hat, derartige Versuche anzustellen, möchte ich mit Rücksicht

darauf, daß z. B. in dem Cranzschen Kinematographen uns eine erheblich bessere Anordnung zur Verfügung steht, dahingestellt sein lassen. Gleichwohl habe ich auf diese Möglichkeit hinweisen wollen, weil nicht immer so große materielle und experimentelle Hilfsmittel zur Verfügung stehen, wie sie der Cranzsche Kinematograph erfordert.

Bull gelang es mit seiner Anordnung, wie bereits erwähnt, etwa 40 bis 50 Teilbilder mit einer Funckenfrequenz von 2000 herzustellen und auf diese Weise z. B. den Libellenflug und die Durchschießung von Seifenblasen zu untersuchen. Um ferner den Mangel, welcher allen derartigen Funckenphotographien anhaftet, daß sie nämlich nur Schattenbilder ergeben, wenigstens einigermaßen unschädlich zu machen, verwendete Bull für seine Aufnahmen vielfach zwei Apparate bzw. zwei Objektive, so daß es ihm möglich war, stereoskopische Bilder herzustellen. Immerhin ist aber auch diese Methode nur ein Notbehelf und dürfte in absehbarer Zeit durch die Funckenkinematographie mit Vorderbeleuchtung (fünftes Kapitel) ersetzt werden.

c) Der ballistische Kinematograph von Cranz.

Alle Mängel, welche den vorstehend beschriebenen Methoden anhaften, also insbesondere die Beschränkung in der Zahl der Teilbilder und der umzusetzenden Energiemenge sind bei dem von Cranz¹⁾ im Jahre 1909 beschriebenen Kinematographen beseitigt. Ja, es wird vielleicht bei seiner weiteren Ausgestaltung und der Aufwendung größerer Energiemengen möglich sein, unter Beibehaltung seines Prinzipes die Vorderbeleuchtungs kinematographie zu verwirklichen.

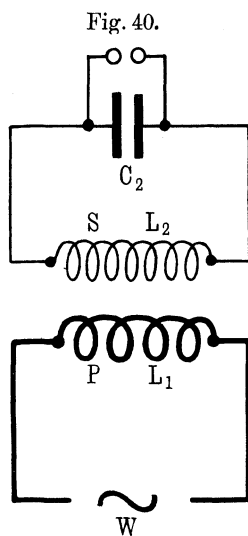
Da dieser Kinematograph insbesondere für ballistische Zwecke, Messung der Geschwindigkeit von Geschossen, Luftwiderstandsversuche und Ähnliches bestimmt ist, so mußte man von vornherein darauf bedacht sein, die sekundliche Zahl der Teilbilder, d. h. also die Funckenfrequenz erheblich zu steigern, damit in allen Fällen genügende Meßgenauigkeit erzielt werden konnte. Die beiden Hauptaufgaben, welche gelöst werden mußten, waren also die Erhöhung der Energie und diejenige der Frequenz. Wollte man die

¹⁾ C. Cranz, Zeitschr. f. d. ges. Schieß- u. Sprengstoffwesen 4, 321 (1909); Deutsche Mech.-Ztg. 1909, S. 173; Lehrbuch der Ballistik III.

erste Aufgabe in wirklich brauchbarer Weise lösen, so mußte man auf die Anwendung von Gleichstrom verzichten, da bei diesem stets große Schwierigkeiten in der Konstruktion geeigneter Unterbrecher auftreten und überdies auch der sehr schlechte Wirkungsgrad der Gleichstrominduktoren sich recht störend bemerkbar macht. Cranz ging somit bei seinem von H. Boas, Berlin, konstruierten Apparate dazu über, Wechselstrom in Verbindung mit geeigneten Transformatoren zur Aufladung der Kapazitäten, welche parallel zur Beleuchtungsfunkkenstrecke liegen, zu verwenden. Es fragte sich nun, welche Art von Transformatoren für den Betrieb am geeignetsten waren, entweder eisengeschlossene oder solche mit offenem Eisenkern. Die Entscheidung war leicht zu fällen, da bereits in der Hochfrequenztechnik genügende Erfahrungen über die beste Methode der Aufladung von Kapazitäten vorlagen. Nach diesen kamen einzig und allein Transformatoren mit offenem Eisenkern, Resonanztransformatoren, in Frage. Bei diesen Resonanztransformatoren ist die Schwierigkeit, daß nach dem Einsetzen des Funkens infolge Kurzschlusses der Sekundärspule eine Lichtbogenbildung eintritt, vollkommen beseitigt. Dies ist für den ballistischen Kinematographen deswegen von großer Bedeutung, weil jede Lichtbogenbildung eine Verlängerung des Beleuchtungsfunkens und die Unmöglichkeit, in sehr kurzen Zeitabständen aufeinander folgende Funken herzustellen, zur Folge hat. Wenn es in diesem Zusammenhange nun auch nicht möglich ist, die vollständige Theorie des Resonanzinduktors wiederzugeben, so möchte ich doch an Hand einiger oszillographischer Aufnahmen das Prinzip der Anordnung erläutern, soweit dieses zum Verständnis der Wirkungsweise des ballistischen Kinematographen erforderlich ist.

Die prinzipielle Schaltung ist in Fig. 40 dargestellt. Der von einer Wechselstrommaschine W gelieferte Wechselstrom wird durch die Primärwicklung P des Resonanzinduktors geleitet. Diese zusammen mit der Maschine stellt einen primären Schwingungskreis mit fest gegebener Periodenzahl dar. Mit diesem Kreise ist der Sekundärkreis, bestehend aus der Sekundärwicklung S mit der Selbstinduktion L_2 und dem Kondensator C_2 , gekoppelt. Wählt man L_2 und C_2 so, daß die Schwingungsdauer des Sekundärkreises mit derjenigen des Primärkreises, d. h. mit der Periodenzahl der Wechselstrommaschine übereinstimmt, daß also, anders ausgedrückt,

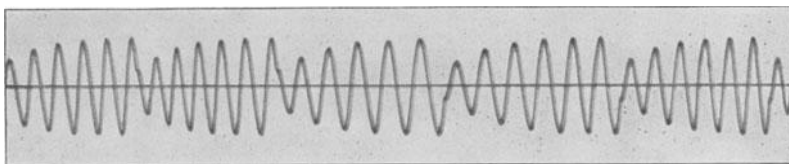
zwischen beiden Kreisen Resonanz besteht, so erfolgt die Energieübertragung in der Weise, daß pro Wechsel stets eine gewisse Energiemenge vom Primär- an den Sekundärkreis abgegeben und infolgedessen die Energie in letzterem allmählich angehäuft wird. Dementsprechend schaukelt sich auch die Spannung E am Kondensator immer höher hinauf, bis sie schließlich die Durchschlagsspannung der parallel geschalteten Funkenstrecke erreicht. In diesem Augenblick wird die gesamte auf der Sekundärkapazität befindliche Energie zur Entladung gebracht. Eine Nachlieferung an Energie von dem Primärkreis im Augenblick der Entladung, welche zur Lichtbogenbildung im Funken Veranlassung geben könnte, kann nicht oder doch nur in äußerst geringem und daher unschädlichem Maße erfolgen, weil in dem Augenblick, in welchem der Funke einsetzt, der Kondensator C_2 gleichsam kurz geschlossen wird und infolgedessen zwischen dem Primär- und dem Sekundärkreis keine Abstimmung mehr vorhanden ist. Von größter Bedeutung ist nun der Vorgang des Emporschaukelns der Energie im Sekundärkreise bzw. der an dem Kondensator C_2 herrschenden Spannung. Würden keine Verluste vorhanden sein, so könnte bei der portionsweisen Zulieferung der Energie theoretisch eine unendlich hohe Spannung an C_2 erreicht werden. Praktisch ist dieser Wert natürlich begrenzt. Betrachten wir nun diesen Grenzwert, so wird er um so schneller erreicht werden, je größer die pro Wechsel vom Primär- auf den Sekundärkreis übertragene Energie, je enger also die Koppelung zwischen beiden, oder bei gleicher Koppelung je stärker die Erregung der Wechselstrommaschine und damit die primäre Energiezufuhr ist. Wählen wir eine lose Koppelung und eine schwache Erregung der Wechselstrommaschine, wie es in dem Oszillogramm der Fig. 41 der Fall ist, so sind zehn bis zwölf Wechsel erforderlich, damit die Einsatzspannung der Funkenstrecke erreicht wird. Bei stärkerer Erregung der Maschine wird dagegen pro Wechsel mehr Energie übertragen (Fig. 42) und infolgedessen bereits nach sieben Wechseln die Funkenstrecke zum Durch-



schlagen zu gehen. Bei stärkerer Erregung der Maschine wird dagegen pro Wechsel mehr Energie übertragen (Fig. 42) und infolgedessen bereits nach sieben Wechseln die Funkenstrecke zum Durch-

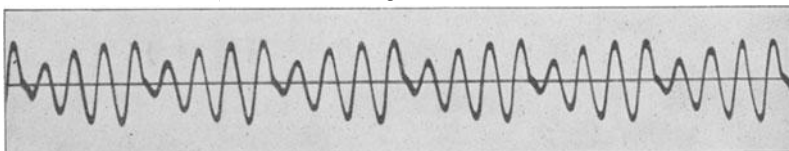
schlagen gebracht. Je weiter man die Erregung der Wechselstrommaschine steigert, um so schneller erfolgt das Hochschaukeln der Sekundärspannung. Die Grenze hierfür ist dann erreicht, wenn das Einsetzen des Funkens in jeder Periode einmal erfolgt (einmaliges Hochschaukeln). Verwendet man nun hochperiodische Wechselstrommaschinen — Cranz benutzt eine solche von 2500 Perioden¹⁾ —, so erhält man auf diese Weise eine Funkenfrequenz

Fig. 41.



von 2500. Wird dann gleichzeitig noch dafür gesorgt, daß die Einsatzspannung der Funkenstrecke möglichst konstant ist — Verwendung von Spitzenelektroden und eines starken Luftgebläses —, so folgen die Funken in vollkommen gleichmäßigen Abständen, zwangsläufig durch die Maschine gesteuert, aufeinander. Diese

Fig. 42.



Anordnung ist die günstigste. Man kann aber die Zahl der Funken steigern, wenn man die Erregung der Wechselstrommaschine noch weiter erhöht. In diesem Fall erhält man zunächst pro Wechsel einen Funken, d. h. bei der erwähnten Anordnung 5000 Beleuchtungsfunken pro Sekunde, und endlich ist es noch möglich, durch weitere Erhöhung der zugeführten Leistung pro Wechsel zwei Entladungen, d. h. eine Funkenfrequenz von 10 000 herzustellen. Man muß aber dann den Nachteil mit in Kauf nehmen, daß die einzelnen Beleuchtungsfunken nicht mehr genau gleiche zeitliche Abstände voneinander haben. Bevor wir nun die praktische Ausführung des nach diesem Prinzip arbeitenden Cranzschen Kine-

¹⁾ Konstruiert von der Firma Hans Boas, Berlin.

matographen besprechen, möchte ich noch einige Bemerkungen über die Größe der aufzuwendenden Energie machen. Diese Energie ist auf der Sekundärseite durch den Energieumsatz pro Funken, durch den Ausdruck

$$\frac{1}{2} C_2 E^2$$

gegeben, wobei C_2 die Kapazität des Sekundärkondensators in Farad und E die Einsatzspannung der Funkenstrecke, gemessen in Volt, bedeutet. Haben wir nun n Funken pro Sekunde, so ist, wenn man zunächst den Wirkungsgrad des Transformators, welcher je nach der Größe und der Frequenz zwischen 80 und 97 Proz. liegt, außer acht läßt, die von der Maschine zu liefernde Energie gegeben durch

$$A = n \frac{1}{2} C_2 E^2.$$

Jede Steigerung der Funkenfrequenz bedeutet also eine erhöhte Beanspruchung der Wechselstrommaschine. Für Aufnahmen nach dem Schattenverfahren hat sich auf Grund zahlreicher Versuche ergeben, daß eine Energie von etwa 0,5 Watt pro Funken genügt¹⁾, um eine ausreichende Beleuchtungsstärke zu erzielen. Die Maschine muß unter diesen Umständen liefern

bei einer Funkenfrequenz von	2500 . . .	1,25 kW
” ” ” ”	5000 . . .	2,5 ”
” ” ” ”	10000 . . .	5 ”

Für Vorderbeleuchtungsaufnahmen ist ein etwa 100 bis 150 mal größerer Energieaufwand pro Funken erforderlich, so daß für diesen Zweck die Leistung der Maschine ganz erheblich gesteigert werden muß (vgl. auch fünftes Kapitel).

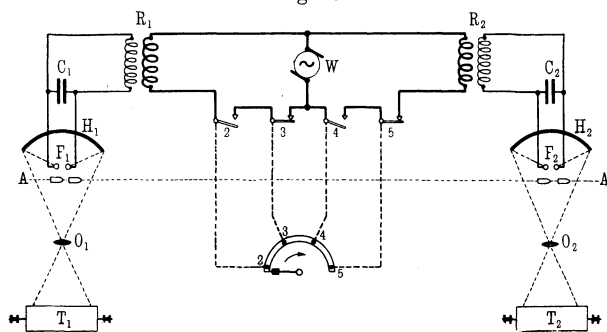
Wir wollen nun dazu übergehen, an der Hand der schematischen Fig. 43 die praktische Ausführung²⁾ des Cranzschen Kinetographen zu besprechen, und zwar zunächst in der ersten Form, bei welcher zum Auslösen der Funkenserien ein Vierschienenpendel benutzt wurde, wie es bereits in dem zweiten Kapitel bei

¹⁾ Die untere Grenze der Beleuchtungsenergie, bei welcher gerade noch Aufnahmen erhalten werden können, dürfte unter sehr günstigen optischen Verhältnissen bei etwa 0,3 Watt liegen.

²⁾ Die konstruktive Ausführung, welche sich vorzüglich bewährt hat, rührt von der Firma Hans Boas her.

den Auslösvorrichtungen besprochen worden ist. W stellt die hochperiodische Wechselstrommaschine dar, welche auf die beiden Resonanzinduktoren R_1 und R_2 geschaltet werden kann¹⁾. Ihre Sekundärwickelungen sind zu Drehkondensatoren C_2 und C_2' geführt, an welche mit möglichst kurzen Leitungen die Beleuchtungsfunkenstrecken F_1 und F_2 angeschlossen sind. Das Bild dieser Funkenstrecken wird mit Hilfe der Hohlspiegel H_1 und H_2 auf den Aufnahmeobjektiven O_1 und O_2 abgebildet, welche ihrerseits wiederum auf die Ebene AA , in welcher das Geschöß fliegt, eingestellt sind. Hinter den Objektiven befinden sich in lichtdichten Kästen die durch Elektromotoren angetriebenen Trommeln T_1 und

Fig. 43.



T_2 , auf welche der Aufnahmefilm aufgespannt wird. Für kleinere Serien werden Stahltrommeln von 500 mm Umfang und 280 mm Breite oder solche von 1500 mm Umfang und 150 mm Breite verwendet. Auf der ersten Trommel können 25 Bilder von 18 mm Höhe und 280 mm Breite, auf der zweiten 75 Bilder gleicher Höhe aufgenommen werden. Handelt es sich darum, längere Serien herzustellen, so finden zwei Stahltrommeln Verwendung, welche synchron angetrieben werden und über die ein Filmband bis zu 11 m Länge ausgespannt werden kann. Dieses Band gestattet dann, maximal etwa 700 Bilder mit einer Höhe von 18 mm und einer Breite von 25 mm aufzunehmen.

¹⁾ Für Aufnahmen von Durchschießungen, Explosionsvorgängen usw. genügt die einfache Anordnung mit einem Resonanzinduktor und einem Aufnahmeapparat. Will man jedoch die Bewegung des Geschößes auf längeren Flugstrecken untersuchen (Luftwiderstandsmessungen usw.), so ist die Verdoppelung der Anordnung, wie sie in Fig. 43 dargestellt ist, erforderlich.

Die Auslösevorrichtung arbeitet folgendermaßen. Auf dem Vierschienenpendel¹⁾ sind, ein wenig gegeneinander verschoben, fünf Kontakte angebracht, welche teils mit Stromschluß, teils mit Stromöffnung arbeiten. Das Pendel selbst wird in der obersten Stellung elektromagnetisch festgehalten. Sobald der zugehörige Stromkreis geöffnet wird, beginnt das Pendel zu fallen und betätigt zunächst den Kontakt 1²⁾, welcher geöffnet wird und damit den Schuß löst. Ein klein wenig später, mit einer aus den räumlichen Verhältnissen der Versuchsanordnung berechenbaren Zeitdifferenz, wird Kontakt 2 geschlossen. Da Kontakt 3 bereits in der Einschaltstellung liegt, so ist nunmehr der Stromkreis für den Resonanzinduktor R_1 geschlossen und die Beleuchtungsfunkenspringen über. Wenn dann das Geschoß den Bildraum des Spiegels H_1 verlassen hat, wird der Funkenstrom durch Ausschalten des Kontaktes 3 wieder unterbrochen. Die Zeit, welche das Pendel braucht, um vom Kontakt 2 nach dem Kontakt 3 zu kommen, muß also mit der Zeit übereinstimmen, welche das Geschoß braucht, um den Bildraum von H_1 zu durchfliegen. Bei der Weiterbewegung des Pendels wird, wenn das Geschoß in den Bildraum des zweiten Spiegels H_2 eintritt, der Kontakt 4 geschlossen und damit der Funkenstrom in F'_2 zum Einsetzen gebracht, welcher dann durch Öffnen des Kontaktes 5 wieder ausgeschaltet wird. Die Umdrehungszahl der Filmtrommeln muß hierbei natürlich so gewählt sein, daß der Film nur während einer Umdrehung belichtet wird.

Die Auslösemethode mit dem Vierschienenpendel hat den Nachteil, daß im Augenblick der Einschaltung des Resonanzinduktors und des Beginnes der Beleuchtungsfunkens fast stets kleine Unregelmäßigkeiten im Einsatzpotential der Funkenstrecken auftreten und infolgedessen die Abstände der Teilbilder ungleich werden. Dieser Mangel wird seit einiger Zeit dadurch vermieden, daß man den Funkenstrom dauernd übergehen läßt. In diesem Falle ist natürlich ein besonderer Momentverschluß vor den Filmtrommeln erforderlich, welcher im richtigen Augenblick geöffnet und nach einer vollen Umdrehung wieder geschlossen wird. Dieser Verschluß bewirkt zweckmäßig auch die Auslösung des Schusses. Die hierfür verwendbaren Anordnungen können verschiedenster Art sein. Meist wird jetzt in

¹⁾ Nur schematisch angedeutet.

²⁾ Dieser Kontakt ist im Schema nicht gezeichnet, da er mit der Funken-
erzeugungsanordnung in keinem direkten Zusammenhang steht.

dem ballistischen Laboratorium der Militärtechnischen Akademie ein mit verstellbarem Schlitz und mit einer Kontakteinrichtung zur elektromagnetischen Auslösung des Schusses versehenes Fallbrett¹⁾ benutzt und, wenn die Aufnahmen auf einer einzigen Trommel erfolgen sollen, eine aus einem Fallbrett und einer rotierenden Schlitzscheibe bestehende Kombination, die von F. Külp herrührt. Beide Einrichtungen haben sich gut bewährt.

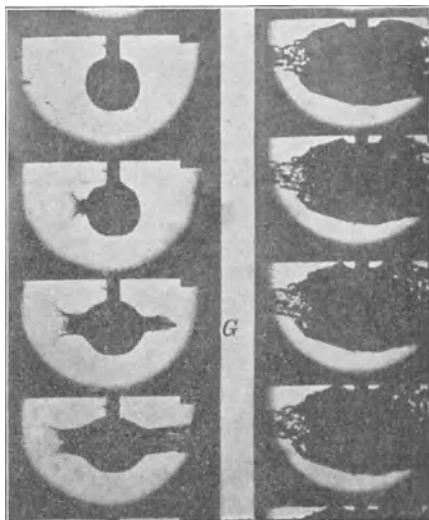
Eine kurze Bemerkung möchte ich endlich noch über die praktische Einstellung der Resonanz am Induktor R hinzufügen. Hat man die Wechselstrommaschine auf die gewünschte Periodenzahl einreguliert, so schaltet man zunächst die Erregung aus und legt parallel zu dem Kondensator C_2 ein statisches Voltmeter, z. B. ein Braunsch'sches Elektrometer. Nunmehr vergrößert man, anfangend von der Nullstellung, den Drehkondensator C_2 so lange, bis das Elektrometer den maximalen Ausschlag anzeigt. Wird C_2 zu groß, so geht der Ausschlag wieder zurück. Diese Einstellung auf das Spannungsmaximum, die Resonanzlage, ist bei Induktoren mit offenem Eisenkern, wie sie gerade für die Aufladung von Kapazitäten nach dem Resonanzprinzip von der Firma Boas gebaut werden, sehr scharf. Außer durch Regulierung der Kapazität kann man, wenn auch nur innerhalb mäßiger Grenzen, die Resonanzstellung²⁾ durch Veränderung der Koppelung zwischen dem Primär- und dem Sekundärkreis des Induktors einstellen. Die so erhaltene Resonanzstellung stimmt aber nicht genau mit der betriebsmäßigen überein. Wenn nämlich die Funken einsetzen und infolgedessen in der Sekundärwicklung Strom fließt, so wird durch Rückwirkung die Selbstinduktion der Sekundärspule verkleinert, so daß die Kapazität etwas vergrößert werden muß, damit auch in diesem Falle die Frequenz des Sekundärkreises, bestimmt durch L_2 und C_2 , mit derjenigen der Wechselstrommaschine übereinstimmt. Bei einiger Übung kann man dies leicht nach dem Gehör feststellen, da nur bei richtiger Resonanzstellung die Funken regelmäßig übergehen und einen sauberen Ton ergeben. Die bei dem Cranzschen Kinematographen im allgemeinen verwendete Sekundärkapazität

¹⁾ Beschrieben in: C. Cranz und Becker, Lehrbuch der Ballistik 3 (Experimentelle Ballistik), 306. Leipzig 1913, B. G. Teubner.

²⁾ Auch andere Methoden zur Einstellung auf Resonanz, z. B. unter Benutzung eines Strommessers, sind möglich und aus der Hochfrequenztechnik bekannt.

hat eine Größe von etwa $0,0027 \mu\text{F}$. Durch diese und die Spannung der Funkenstrecke ist die im Beleuchtungsfunken umgesetzte Energiemenge festgelegt. Will man nun unter Beibehaltung der vorhandenen Apparatur hellere Beleuchtungsfunken herstellen, so kann man dies zunächst durch Vergrößerung der Funkenstrecke erreichen. Nun kann der Drehkondensator C_2 jedoch nur mit einer verhältnismäßig niedrigen Funkenspannung beansprucht werden. Infolgedessen ist es meist zweckmäßiger, die Kapazität zu steigern. Da aber das Produkt $L_2 C_2$ bei gegebener Frequenz der Wechselstrommaschine konstant gehalten werden muß, so kann man die Vergrößerung von C_2 nur vornehmen, wenn man gleichzeitig L_2 verkleinert. Bei den Boaschen Resonanzinduktoren ist dies meist leicht auszuführen, da bei ihnen die Sekundärwicklung in einzelne Spulen unterteilt wird. Nimmt man z. B. nur die Hälfte der Spulen, so muß man für die gleiche Periodenzahl die Kapazität vervierfachen. Allerdings braucht dann der Induktor zum Hochschaukeln auf dieselbe Funkenspannung wie vorher die vierfache Zeit, bzw. bei gleicher Zeit die vierfache Energie. Ist also die Leistung der Wechselstrommaschine begrenzt, so läßt sich die Energiesteigerung im Beleuchtungsfunken nur auf Kosten der Funkenfrequenz erzielen. Auf diese Weise kann man schließlich so weit kommen, daß die Beleuchtungsfunken hell genug sind, um kinematographische Aufnahmen mit Vorderbeleuchtung herzustellen, allerdings zunächst nur mit niedriger Funkenfrequenz. Derartige Versuche sind bereits in der Militärtechnischen Akademie angestellt worden und haben brauchbare Resultate ergeben¹⁾, so

Fig. 44.



vierfache Zeit, bzw. bei gleicher Zeit die vierfache Energie. Ist also die Leistung der Wechselstrommaschine begrenzt, so läßt sich die Energiesteigerung im Beleuchtungsfunken nur auf Kosten der Funkenfrequenz erzielen. Auf diese Weise kann man schließlich so weit kommen, daß die Beleuchtungsfunken hell genug sind, um kinematographische Aufnahmen mit Vorderbeleuchtung herzustellen, allerdings zunächst nur mit niedriger Funkenfrequenz. Derartige Versuche sind bereits in der Militärtechnischen Akademie angestellt worden und haben brauchbare Resultate ergeben¹⁾, so

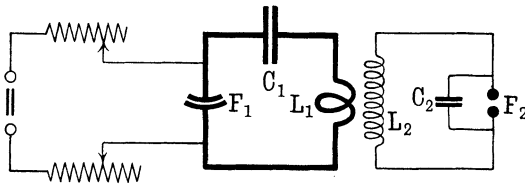
¹⁾ C. Cranz, P. A. Günther u. F. Külp, Zeitschr. f. d. ges. Schieß- u. Sprengstoffwesen 9, 64 (1914) (Abb. Nr. 28).

daß in Aussicht genommen ist, durch Aufstellung größerer Maschinenaggregate unter Beibehaltung der prinzipiellen Anordnung des Cranzschen Kinematographen denselben auch für Vorderbeleuchtungskinematographie auszugestalten. Zum Schluß mag endlich noch als Beispiel für die Leistungsfähigkeit des Apparates eine kinematographische Aufnahme wiedergegeben werden (Fig. 44), welche nach dem Schattenverfahren mit 5000 Funken pro Sekunde hergestellt ist und die Durchschießung einer Tonkugel darstellt.

d) Die Cranz-Glatzelsche Methode zur Erzeugung beliebiger Funkenzahlen.

Für einzelne Spezialuntersuchungen auf dem Gebiete der Ballistik war es wünschenswert, noch höhere Funkenfrequenzen zur Verfügung zu haben, als sie der ballistische Kinematograph von Cranz besitzt. Dies führte zur Ausarbeitung einer Methode¹⁾,

Fig. 45.



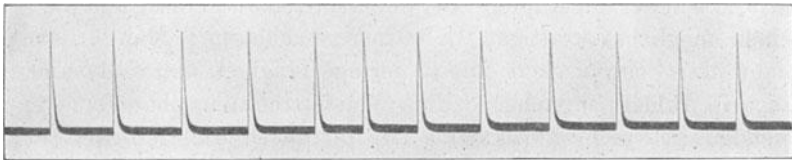
welche unter Benutzung bekannter Prinzipien der Hochfrequenztechnik es ermöglichte, Funkenfrequenzen bis zu 100000 zu erreichen. Gleichzeitig besaß diese Methode den Vorteil, daß durch einfache Abänderung der elektrischen Größen auch jede beliebige tiefer liegende Frequenz bis etwa auf 200 herab eingestellt werden konnte, so daß man in der Lage war, jede beliebige, für den jeweiligen Zweck der Untersuchung wünschenswerte Funkenfrequenz innerhalb der Grenzen 200 und 100000 anzuwenden²⁾. Das prinzipielle Schaltungsschema ist in Fig. 45 dargestellt. C_1 ist ein Glimmerkondensator, dessen Größe durch Parallelschaltung von Einzelelementen von 25000 bis 600000 cm geändert werden kann. Der Kondensator C_1 wird über Vorschaltwiderstände W von

¹⁾ C. Cranz u. Br. Glatzel, Verhandl. d. D. Phys. Ges. **14**, 525 (1912).

²⁾ Übrigens stellen diese Zahlen weder die untere noch obere mögliche Grenze dar.

einem Gleichstromnetz (600 bis 700 Volt) aus aufgeladen. Sobald dann die Einsatzspannung der Entladestrecke F_1 erreicht ist, entlädt sich C_1 über diese und die Selbstinduktion L_1 . Diese Entladung erfolgt, wenn L_1 klein ist im Vergleich zu C_1 aperiodisch, verläuft aber nicht bis ans Ende, sondern reißt nach einer gewissen Zeit infolge der Löschwirkung der Entladestrecke F_1 ab. In der Hochfrequenztechnik pflegt man diese Anordnung als „aperiodische Stoßerregung“ zu bezeichnen¹⁾. Sobald die Entladung beendet ist, erfolgt vom Gleichstromnetz aus die Neuaufladung des Kondensators. Die hierfür erforderliche Zeit ist um so kleiner, je kleiner die Kapazität von C_1 , je höher die Netzspannung und je kleiner der in der Zuleitung liegende Widerstand ist. Vom energetischen Standpunkt aus ist es noch zweckmäßiger, an Stelle des Widerstandes eine Selbstinduktion in die Ladeleitung einzuschalten, da man dann, infolge der oszillatorischen Aufladung, an C_1 und damit auch an der Entladungsstrecke F_1 nahezu eine Verdoppelung der Ladespannung und hierdurch ein sicheres Ein-

Fig. 46.



setzen von F_1 erhält. In einzelnen sind die hier sich abspielenden Vorgänge bereits im dritten Kapitel abgeleitet, so daß es sich erübrigt, an dieser Stelle nochmals darauf einzugehen. In Fig. 46 ist zur besseren Erläuterung der aperiodischen Stoßerregung eine oszillographische Aufnahme des Stromverlaufes im Primärkreise wiedergegeben. Man sieht, daß jede Entladung gleichsam einen einzigen Stoß darstellt und daß diese einzelnen Entladestöße in regelmäßigen Abständen schnell aufeinander folgen. Die sekundliche Stoßzahl läßt sich dabei, wie bereits oben mitgeteilt, durch passende Wahl der Ladespannung, Kapazität und der Vorschaltwiderstände bzw. -selbstinduktionen leicht innerhalb der Grenzen 200 und 100000 verändern, Werte, die sich aber bei Bedarf noch

¹⁾ H. Rein, Phys. ZS. **11**, 591 (1910); Br. Glatzel, Methoden zur Erzeugung von Hochfrequenzenergie, S. 43. Verlag Hachmeister u. Thal, Leipzig 1913.

weiter nach oben und unten verschieben lassen. Jeder einzelne Stoß wirkt nun auf den Sekundärkreis $L_2 C_2$ und ladet die Kapazität C_2 bis zum Einsetzen der Beleuchtungsfunkstrecke F_2 auf. Die Zahl der auf diese Weise entstehenden Beleuchtungsfunken entspricht genau der Stoßzahl des Primärkreises. Eine scharfe Abstimmung zwischen beiden Kreisen ist bei dieser idealen Stoßerregung nicht erforderlich. Jedoch muß die Schwingungsdauer des Sekundärkreises möglichst klein gemacht werden, um in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit C_2 aufzuladen. Bei der praktischen Versuchsanordnung hatte C_2 eine Kapazität von etwa 1800 cm, während L_2 $4,7 \cdot 10^{-4}$ Henry betrug. Die Koppelung zwischen beiden Kreisen war so eng als möglich gemacht, indem L_1 und L_2 , welche als Flachspulen gewickelt waren, aufeinander gelegt wurden. Als Entladestrecke F_1 kann nur eine solche mit vorzüglicher Löschwirkung, z. B. die Schellersche Spiritusfunkstrecke¹⁾, Verwendung finden, da sich anderenfalls die höchsten Funkenfrequenzen nicht erreichen lassen. Die Beleuchtungsfunkstrecke F_2 wird zweckmäßig entsprechend den Darlegungen im dritten Kapitel mit Kupfer- oder Silberspitzen ausgeführt und durch einen möglichst kräftigen Luftstrom angeblasen. Man erreicht dann ohne Schwierigkeit eine so geringe Trägheit, daß vollkommen scharfe Bilder entstehen. Eine Wasserstoffatmosphäre zu verwenden, ist nicht zweckmäßig, da hierdurch die Helligkeit der Funken zu stark herabgesetzt wird, so daß diese, wenigstens für die höchsten Funkenfrequenzen nicht mehr genügt, um gute Bilder zu erhalten. Als Beispiele für die mit der Methode erreichbaren Resultate mögen die Figg. 47 und 48 a, b, c dienen. Fig. 47 ist mit einer Funkenfrequenz von 6400 aufgenommen und stellt die Durchschießung eines Holzstückchens dar, welches vor der Mündung einer Pistole — am rechten Rande der Bilder sichtbar — aufgestellt war. Das Geschloß hat im fünften Bilde gerade die Mündung der Pistole verlassen. Im sechsten Bilde befindet es sich innerhalb des Holzstückchens, während im siebenten Bilde der Ausschuß zu sehen ist. Dann verläßt das Geschloß das Gesichtsfeld, während das Holzstück unter weiterer Zersplitterung allmählich umfällt. Es ist interessant, daß hierfür im Vergleich

¹⁾ Ausführung der Firma C. Lorenz, A.-G. für Vieltonstationen. Wahrscheinlich eignen sich für diesen Zweck auch die neuen Wolframfunkenstrecken von H. Boas, Verhandl. d. D. Phys. Ges. 15, 1130 (1913).

zur Geschößbewegung eine relativ große Zeit erforderlich ist. Fig. 48 a, b, c sind Aufnahmen des frei fliegenden Geschößes. Fig. 48 a entspricht 56 600, Fig. 48 b 72 000, Fig. 48 c 92 200 Funken pro Sekunde. Die Mündung ist an dem rechten Rande der Bilder gerade noch sichtbar. Aus der Mündung tritt das Geschöß samt den Pulvergasen aus. Da in der Aufnahme der Fig. 48 c auf einer Flugstrecke des Geschößes von 25,7 cm etwa 72 sukzessive

Fig. 47.

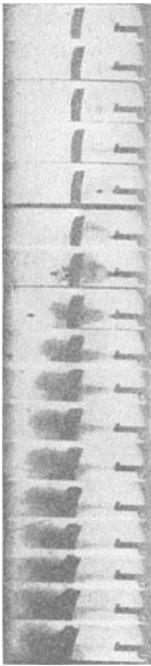
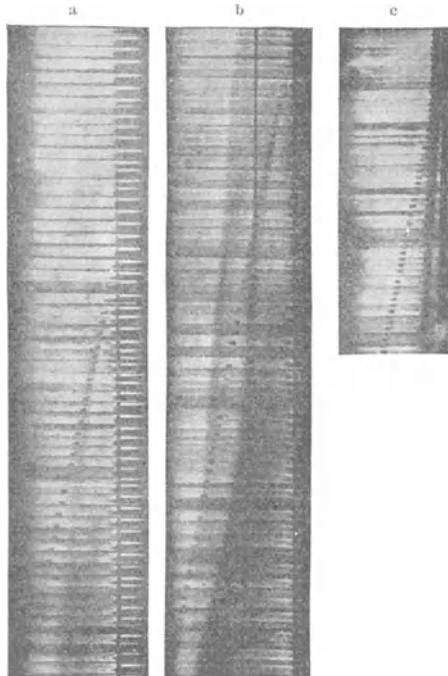


Fig. 48.



Bilder des vorrückenden Geschößes vorhanden sind, so sieht man, daß diese Methode es gestattet, auch auf ganz kurzen Strecken Messungen über Bewegung von Geschößen vorzunehmen. Die Hauptschwierigkeit bei derartigen Aufnahmen liegt, wie auch die Bilder zeigen, eigentlich weniger in der Erzielung hoher Funkenzahlen als vielmehr darin, daß die Höchstgeschwindigkeit des bewegten Films durch dessen mechanische Festigkeit begrenzt ist und infolgedessen die Teilbilder nur sehr klein gemacht werden können, wenn sie sich nicht überdecken sollen. Bezüglich der

anzuwendenden Auslöse- und Belichtungsmethoden gilt das gleiche, was bereits am Schluß der Besprechung des Cranzschen Kinematographen gesagt worden ist. Auch hier empfiehlt es sich, den Funkenstrom vor Beginn des Schußvorganges einzuleiten, damit die Funkenstrecke sich etwas einbrennt und kleine Störungen im Einsatzpotential, wie sie im Anfang leicht auftreten, vermieden werden. Nur dann befinden sich die einzelnen Teilbilder in regelmäßigen Abständen, wie es in den oben wiedergegebenen Aufnahmen zu sehen ist.

Gegenüber dem Cranzschen Kinematographen hat die hier geschilderte Methode den Nachteil, daß es schwer ist, die umzusetzende Energie über ein gewisses Maß zu steigern, wenn man nicht recht hohe Gleichstromspannungen, 2000 bis 3000 Volt, anwenden will, was immerhin mit erheblichen Schwierigkeiten verknüpft ist. Nach den bisher vorliegenden Erfahrungen dürfte die obere Energiegrenze bei etwa 1,5 kW liegen, so daß also wenig Aussicht vorhanden ist, das Prinzip der Methode auch für Zwecke der Vorderbeleuchtungskinematographie zu verwerten. Sieht man aber hiervon ab, so wird die Anordnung für viele Untersuchungen nach dem Schattenverfahren, hauptsächlich auch mit Rücksicht auf ihre große Einfachheit und Betriebssicherheit, manche Dienste leisten können.

e) Die Schattesehe Methode zur Erzeugung hoher Funkenfrequenzen.

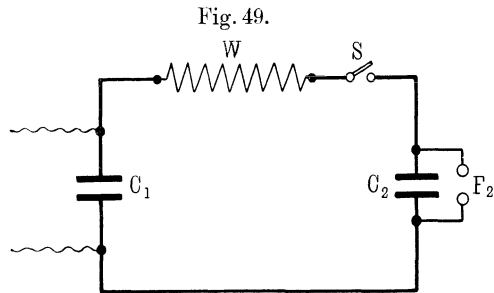
Eine andere Methode zur Erzeugung hoher Funkenfrequenzen ist von Schatte¹⁾ angegeben worden und in Fig. 49 dargestellt. Der prinzipielle Vorgang ist der gleiche wie bei der Töplerschen Schaltung, nur werden die beiden Kondensatoren C_1 und C_2 nicht, wie es zur Erzeugung eines einzigen Funkens erforderlich ist, gleich gemacht, sondern C_1 erheblich größer als C_2 . Die Folge hiervon ist, worauf bereits früher hingewiesen wurde, daß in der Beleuchtungsfunkenstrecke F_2 nicht ein einziger Funke entsteht, sondern eine Funkenserie, deren Frequenz um so höher ist, je kleiner man C_2 und F_2 wählt. Schatte benutzt ferner nicht die oszillatorische Aufladung des Kondensators C_2 , sondern die aperioidische, indem er in den Kreis einen Wasserwiderstand W einschaltet. Die Funkenstrecke F_1 bei Töpler wird, um das Einsetzen der Entladung zu bewirken, durch einen einfachen Schalter S

¹⁾ Schatte, ZS. f. d. ges. Schieß- u. Sprengstoffwesen 7, 65 (1912).

ersetzt. Wenn nun C_1 sehr viel größer als C_2 (etwa 1000 bis 10000 mal) ist, so können wir annehmen, daß innerhalb einer gewissen Zeit, von der Schließung des Schalters S an gerechnet, die Spannung E , mit welcher der Kondensator C_2 geladen wird, konstant ist. Um C_2 auf die Einsatzspannung von F_2 zu bringen, ist nun stets die gleiche kleine Elektrizitätsmenge q erforderlich. Da die Ladespannung E praktisch als konstant zu betrachten ist¹⁾, so wird mithin die Zeit zur Aufladung von C_2 stets dieselbe sein, also auch die in F_2 entstehenden Funken in gleichen Abständen aufeinander folgen. Durch Änderung von C_2 bzw. F_2 ist es dann leicht möglich, jede gewünschte Funkenfrequenz herzustellen. Schatte ge-

langes auf diese Weise, 9000 bis 50000 Funken pro Sekunde mit hinreichender Gleichmäßigkeit zu erzeugen. Die Hauptschwierigkeit der an sich gut arbeitenden Methode besteht für die Praxis

darin, daß die in dem Kondensator C_1 zur Verfügung stehende Energie begrenzt ist und man stets für eine gute Isolation zu sorgen hat. Der Nachteil der begrenzten Energie macht sich besonders dann unangenehm fühlbar, wenn man die Justierung der Beleuchtungsfunkestrecke und der optischen Anordnung ausführen und hierzu einen länger andauernden Funkenstrom erzeugen will, was z. B. bei der Cranz-Glatzelschen Methode ohne Schwierigkeit möglich ist. Auch hinsichtlich der Steigerung der im Beleuchtungsfunken umgesetzten Energie sind hier, wie ohne weiteres ersichtlich ist, erhebliche Schwierigkeiten vorhanden. Immerhin dürfte auch die Schattische Anordnung für manche Zwecke mit Vorteil anzuwenden sein, um so mehr, als ja vielfach für die Wahl der einen oder der anderen Methode zur Funken-erzeugung die in einem Laboratorium gerade vorhandenen experimentellen Hilfsmittel von maßgebendem Einfluß sein werden.



¹⁾ Diese Voraussetzung gilt natürlich nur solange als die Flaschenbatterie voll geladen ist und läßt sich bei mangelhafter Isolation entweder gar nicht oder nur schwer erfüllen.

Fünftes Kapitel.

**Elektrische Momentphotographie
mit Vorderbeleuchtung.**

In dem vorhergehenden Kapitel haben wir einige Aufnahmen kennen gelernt, welche den großen Wert der elektrischen Momentphotographie für wissenschaftliche und technische Forschung deutlich erkennen lassen. Ein gewisser Mangel haftet diesen Aufnahmen jedoch noch insofern an, als sie nur Schattenbilder des sich abspielenden Vorganges wiedergeben, so daß es unmöglich ist, Einzelheiten innerhalb des Umrisses des bewegten Gegenstandes zu erkennen. Bis zu einem gewissen Grade kann man diesem Mangel dadurch abhelfen, daß man an den zu untersuchenden Teilen Verlängerungen, Spitzen usw. anbringt, welche über den Umriss herausragen¹⁾ und die es dann ermöglichen, auch die Bewegung innerer Teile erkennbar zu machen. Abgesehen davon, daß dieses Verfahren nicht in allen Fällen anwendbar ist, stellt es aber auch nur einen Notbehelf dar, so lange man nicht Besseres zur Verfügung hat. Der geschilderte Nachteil haftet nun z. B. den gewöhnlichen photographischen Aufnahmen, bei welchen mit Dauerbelichtung und Momentverschlüssen gearbeitet wird, nicht an, weil bei diesen Photographien infolge der angewendeten Vorderbeleuchtung der aufzunehmende Gegenstand nicht als Schattenriß, sondern in allen Einzelheiten auch innerhalb seines Umrisses auf der Platte wiedergegeben wird. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache erschien es also wünschenswert, dieses sonst übliche photographische Aufnahmeverfahren mit „Vorderbeleuchtung“ auch bei der elektrischen Momentphotographie anzuwenden. Zunächst scheiterten die Versuche aber daran, daß es nicht möglich war, genügend helle und gleichzeitig genügend kurzdauernde Funken herzustellen. Die Lichtausbeute für die photographische Aufnahme ist nämlich in diesem Falle sehr viel ungünstiger, da ja nur das diffus von dem Gegenstand reflektierte Licht verwendet werden kann. Wollte man also diese Aufgabe lösen, so war es zunächst erforderlich,

¹⁾ C. Cranz u. K. Becker, Lehrbuch der experimentellen Ballistik, S. 293. Verlag von Teubner, Leipzig 1913. Cranz-Külp, Artilleristische Monatshefte, 1914, Nr. 89, S. 251 ff.

den Beleuchtungsfunken erheblich heller zu machen, also große Kapazitäten bei hohen Funkenspannungen anzuwenden. Die Herstellung hierfür geeigneter Kapazitäten ist neuerdings durch die Konstruktion von Glimmerkondensatoren mit hoher Durchschlagsfestigkeit und geringen Verlusten bei verhältnismäßig kleinen äußeren Abmessungen gelungen¹⁾. Vor allem war es nun wichtig, den Energiebedarf des einzelnen Beleuchtungsfunkens bei Anwendung der Methode der Vorderbeleuchtung festzustellen. Die grundlegenden Versuche hierfür sind vor einiger Zeit in dem ballistischen Laboratorium der Militärtechnischen Akademie von Cranz, Günther und Külp²⁾ vorgenommen worden. Es ergab sich dabei, daß man vollkommen ausreichende Helligkeit erhält, wenn man eine Kapazität von etwa 0,1 bis $0,15 \cdot 10^{-6}$ Farad und eine Funkenspannung von etwa 40 000 Volt anwendet. Hieraus berechnet sich die pro Funken erforderliche Mindestenergie zu etwa 80 Watt, während für Schattenaufnahmen nur 0,5 Watt aufzuwenden waren. Durch Verwendung besonders guter Scheinwerfer, wie es z. B. Boas getan hat, läßt sich die notwendige Energie noch etwas herabdrücken. Handelt es sich nun zunächst nur um Einzelaufnahmen, so macht es keine besonderen Schwierigkeiten, diese Energie in den Kondensatoren aufzuspeichern. Verwendet man gleichzeitig noch Funkenstrecken mit guter Löschwirkung — Anblasen mit einem kräftigen Luftstrom usw. — so läßt auch die Schärfe der Momentaufnahmen wenig zu wünschen übrig. Allerdings wird es häufig, um wirklich tadellose Aufnahmen zu erzielen, zweckmäßiger sein, die gesamte Energie nicht in einer einzigen Funkenstrecke zur Entladung zu bringen, sondern sie auf mehrere zu verteilen, damit die Ionisierung der einzelnen Funkenstrecken und damit ihre Trägheit nicht zu groß wird. Dieses Verfahren, welches Cranz, Günther und Külp ebenfalls bei ihren ersten Versuchen angewendet haben, besitzt gleichzeitig in optischer Hinsicht noch den Vorteil, daß man durch entsprechende räumliche Anordnung der Funkenstrecken eine gleichmäßige Beleuchtung des Gegenstandes unter Vermeidung von Schattenwirkungen erreichen kann. Wie groß die Vorzüge derartiger „Vorderbeleuch-

¹⁾ Die Firma Boas hat Kondensatoren mit einer Kapazität von 0,1 bis $0,15 \mu\text{F}$ für eine Funkenspannung von etwa 40 000 Volt für diese Versuche hergestellt.

²⁾ C. Cranz, P. A. Günther u. F. Külp, ZS. Schuß u. Waffe **6**, 397 (1913).

tungsaufnahmen“ hinsichtlich Erkennung von Einzelheiten sind, zeigt ohne weiteres der Vergleich der beiden in Fig. 50 und 51 wiedergegebenen Aufnahmen einer Selbstladepistole (Auswerfen der leeren Patronenhülse nach dem Schuß). Es dürfte ohne weiteres ersichtlich sein, daß das Vorderbeleuchtungsverfahren

Fig. 50.



gegenüber dem Schattenverfahren für zahlreiche physikalische und technische Vorgänge, z. B. Prüfung von Tachometern, Aufnahme von Explosionserrscheinungen, Untersuchung der Arbeitsweise von Dampfhämmern, Meißeln usw. ganz erheblich größere Vorteile besitzt, ja unter Umständen derartige Aufnahmen überhaupt erst verwertbar macht.

Für viele Untersuchungen wird aber die Einfachfunkenphotographie nicht genügen und das Bedürfnis vorhanden sein, auch unter Anwendung der Vorderbeleuchtung kinomatographische Aufnahmen in ähnlicher Weise herzustellen wie bei dem reinen

Fig. 51.



Schattenverfahren. Hier liegen nun die Verhältnisse erheblich schwieriger insofern, als bedeutend größere Energiemengen aufzuwenden und in den Beleuchtungsfunktenstrecken zu bewältigen sind. Nehmen wir z. B. an, daß eine Funkenfrequenz von 1000, welche wohl zunächst für die Mehrzahl der zu untersuchenden Vorgänge genügen wird, erforderlich ist, so bedeutet dies bei Zugrundelegung der oben angegebenen Wattzahl pro Funken einen

Energieaufwand von 80 Kilowatt, also eine Leistung, welche ganz erheblich über diejenige hinausgeht, welche z. B. bei dem Cranzschen Kinematographen zur Verfügung steht. Wenn nun auch prinzipiell kein Bedenken vorhanden ist, unter Benutzung des dort geschilderten Prinzips durch Verwendung einer größeren Wechselstrommaschine in Verbindung mit einem kräftigeren Resonanzinduktor, welcher eine entsprechend größere Sekundärkapazität aufladet, die gewünschte Energie in die Funkenstrecke hineinzubringen, so dürfte doch die konstruktive Ausführung der Maschinen und Apparate nicht nur sehr große praktische Schwierigkeiten bereiten, sondern auch die Aufwendung erheblicher finanzieller Mittel erfordern. Immerhin haben einige Vorversuche mit dem vorhandenen Cranzschen Kinematographen gezeigt, daß es möglich sein wird, nach dieser Methode kinematographische Vorderbeleuchtungsaufnahmen herzustellen, allerdings zunächst nur mit niedrigen Funkenfrequenzen.

Handelt es sich nur darum, eine kleine Serie von aufeinanderfolgenden Momentaufnahmen herzustellen, so liegen die Verhältnisse erheblich einfacher. Man verwendet nämlich dann zweckmäßig das Verfahren der sukzessiven Entladung einer Reihe von Kapazitäten, wie es für Mehrfachfunkenphotographie zuerst von Schwinning benutzt worden ist. Diese Anordnung, an deren experimenteller Ausgestaltung augenblicklich in dem ballistischen Laboratorium der Militärtechnischen Akademie von Cranz und Kulp gearbeitet wird, hat gegenüber dem Wechselstromkinematographen den Vorzug größerer Einfachheit und dürfte für viele Fälle zunächst auch genügen. Immerhin wird man aber doch mit Rücksicht auf die große Bedeutung der hier zu lösenden Aufgaben in absehbarer Zeit dazu übergehen müssen, den Cranzschen Kinematographen auch für Vorderbeleuchtung auszugestalten.

Bisher erschienene Hefte
der
Sammlung Vieweg

- Heft 1. Dr. Robert Pohl und Dr. P. Pringsheim-Berlin: *Die lichtelektrischen Erscheinungen*. Mit 36 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 2. Dr. C. Freiherr von Girsewald-Berlin-Halensee: *Peroxyde und Persalze*. M. 2,40.
- Heft 3. Diplomingenieur Paul Béjeuhr-Charlottenburg: *Der Blériot-Flugapparat und seine Benutzung durch Pegoud vom Standpunkte des Ingenieurs*. Mit 26 Abbildungen. M. 2,—.
- Heft 4. Dr. Stanislaw Loria-Krakau: *Die Lichtbrechung in Gasen als physikalisches und chemisches Problem*. Mit 3 Abbildungen und 1 Tafel. M. 3,—.
- Heft 5. Professor Dr. A. Gockel-Freiburg i. d. Schweiz: *Die Radioaktivität von Boden und Quellen*. Mit 10 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 6. Ingenieur D. Sidersky-Paris: *Brennereifragen: Kontinuierliche Gärung der Rübensäfte. — Kontinuierliche Destillation und Rektifikation*. Mit 24 Abbildungen. M. 1,60.
- Heft 7. Hofrat Professor Dr. Ed. Donath und Dr. A. Gröger-Brünn: *Die flüssigen Brennstoffe, ihre Bedeutung und Beschaffung*. Mit 1 Abbildung. M. 2,—.
- Heft 8. Geh. Reg.-Rat, Professor Dr. Max B. Weinstein-Berlin: *Kräfte und Spannungen. Das Gravitations- und Strahlenfeld*. M. 2,—.
- Heft 9/10. Geh. Reg.-Rat, Professor Dr. O. Lummer-Breslau: *Verflüssigung der Kohle und Herstellung der Sonnentemperatur*. Mit 50 Abbildungen. M. 5,—.
- Heft 11. Dr. E. Przybyllok: *Polhöhen-Schwankungen*. Mit 8 Abbildungen. M. 1,60.
- Heft 12. Professor Dr. Albert Oppel-Halle a. S.: *Gewebekulturen*. Mit 32 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 13. Dr. Wilhelm Foerster-Berlin: *Kalenderwesen und Kalenderreform*. M. 1,60.
- Heft 14. Dr. O. Zoth-Graz: *Über die Natur der Mischfarben auf Grund der Undulationshypothese*. Mit 3 Textfiguren und 10 Kurventafeln. M. 2,80.