

des Bleioxys, indem die Verbindungen 1,2,4,6 und 1,2,3,6 geringere Neigung zur Dinitrokresolbildung zeigen als ihre Isomeren.

Beim Erhitzen mit Soda im Verpuffungsröhrchen wurden ebenfalls bemerkenswerte Unterschiede festgestellt. Hierbei verhielten sich (α)-1,2,3,4 und (γ)-1,3,4,6 Trinitrotoluol wenig widerstandsfähig, (α)-1,2,4,6-Trinitrotoluol günstiger, am besten die Trinitrotoluole 1,3,4,5 (δ), 1,2,3,6 (ϵ), 1,2,3,5 (ζ). Das angegebene Verhalten der 1,2,3,4- und 1,3,4,6-Verbindungen ist deshalb von Interesse, weil gerade diese beiden, leichter mit Alkali reagierenden Isomeren als Nebenprodukte der Nitrierung in den Abfallprodukten der Trinitrotoluolfabrikation in größeren Mengen aufgefunden wurden.

Zu einer Meinungsäußerung darüber, ob das Auftreten isomerer Trinitrotoluole irgendwie für vorgekommene Unglücksfälle im Trinitrotoluolbetriebe verantwortlich gemacht werden könne, erscheint das vorliegende experimentelle Material nicht ausreichend.

Verhalten der isomeren Trinitrotoluole.

Konstitution	Schmp. °C	Kristall- form (aus Methyl- alkohol)	Verhalten gegen		Verpuffungs- temperatur ¹⁾	
			Na ₂ CO ₃ in siedendem Alkohol	PbO in siedendem Alkohol	für sich allein °C	in Mischg. mit Soda ²⁾ °C
α -Trinitrotoluol 1,2,4,6	80,5	Nadeln	Färbt sich dunkelrot braun, ohne in Dinitrokresol überzugehen; wird bei längerem Kochen in andere dunkle Salze übergeführt.	Bleibt unverändert	281 290 300	233 230
β -Trinitrotoluol 1,2,3,4	112	Nadeln	Gibt Dinitrokresolnatrium; die Reaktion geht leicht vonstatten.	Gibt leicht verpuffendes Dinitrokresolblei.	301 303 301	215 208
γ -Trinitrotoluol 1,3,4,6	104	Körner	desgl.	desgl.	288 293 292	198 191 193
δ -Trinitrotoluol 1,3,4,5	137,5 (134)	Körner	desgl.	desgl.	305 316 318	252 252 252
ϵ -Trinitrotoluol 1,2,3,6	111	Nadeln	Gibt etwas Dinitrokresolnatrium; die Reaktion geht sehr langsam vor sich.	Bleibt fast unverändert.	334 327 335	250 249
ζ -Trinitrotoluol 1,2,3,5	97	Körner	Gibt Dinitrokresolnatrium; die Reaktion geht leicht vonstatten.	Gibt leicht verpuffendes Dinitrokresolblei.	335 333 337	268 271

¹⁾ Der Versuch wurde mit 0,2 g Substanz angestellt.

²⁾ Auf 0,25 g Trinitrotoluol kamen 0,05 g Soda.

[A. 4.]

Über Hochfrequenz-Schlierenkinematographie und ihre Verwendung zur Untersuchung von Explosionserscheinungen und anderen sehr rasch verlaufenden Vorgängen.

Von C. CRANZ und E. BAMES, Charlottenburg.

Mitteilung aus dem Institut f. techn. Physik der Techn. Hochschule Berlin.

Unter einer Schliere, die sich in einem durchsichtigen, festen oder flüssigen oder gasförmigen Medium befindet, versteht man eine Stelle, an der die Homogenität des Mediums irgendwie gestört, und folglich das Lichtbrechungsvermögen abgeändert ist gegenüber demjenigen der Umgebung der Stelle; dies kann z. B. in Glas eine Stelle von höherem Bleigehalt oder von anormaler Spannung sein, oder in einem Gas eine Stelle, an der die betreffende Gasmasse eine Änderung der Temperatur oder des Drucks oder von beiden aufweist oder aber eine Stelle, an der die Gasmasse mit einem anderen Gas von abweichender Dichte durchsetzt

ist. Im vorliegenden Fall möge es sich um Schlieren handeln, die in sehr kurzer Zeit eine Umänderung erfahren, z. B. sehr rasch entstehen oder sehr rasch verschwinden, und die ohne besondere Vorrichtungen mit dem bloßen Auge nicht oder kaum wahrzunehmen seien.

Die Sichtbarmachung und folglich auch die photographische Aufnahme von Schlieren erfolgt entweder nach dem Schattenschlierenverfahren von Dvořák oder nach dem Objektiv-Abblendungsverfahren von Töpler. Bei dem erstenen Verfahren erzeugt man ein Schattenbild der Schliere auf der photographischen Platte; man erhält also die Abbildung der Schliere in der wahren Größe derselben oder etwas vergrößert, je nachdem man parallele Lichtstrahlen oder das Licht einer mehrere Meter von der Schliere entfernten punktförmigen Lichtquelle auf die Schliere fallen läßt. Bei der Töplerschen Methode wird eine angenähert punktförmige Lichtquelle f (Fig. 1) mittels eines Hohlspiegels S oder statt dessen mittels einer Sammellinse auf der Mitte des Objektivs O einer photographischen Kamera abgebildet, deren Mattscheibe auf den Ort A der Schliere eingestellt ist. Auf der Mattscheibe kommt alsdann die Schliere A als einseitig dunkles Schattenbild a auf hellem Grund zum Vorschein, wenn man vor dem Objektiv O eine scharfkantige Blende so weit vorschiebt, daß die durch die Schliere erzeugten irregulären Lichtstrahlen abgeblendet sind. Werden dagegen lediglich die regulären Lichtstrahlen abgeblendet, d. h. wird nur das ohne Vorhanden ein der Schliere A auf dem Objektiv O entworfene helle Bild der Lichtquelle f abgeblendet, so sieht man auf der Mattscheibe die Schliere hell auf dunklem Grund. Die Größe des Schlierenbildes ist natürlich bedingt durch die Brennweite des Objektivs O.

Wenn die Schliere sich rasch verändert, so wird man entweder, nämlich bei der Verwendung einer kontinuierlichen Lichtquelle f, einen Momentverschluß anwenden, oder aber, wenn die Änderung der Schliere so schnell vor sich geht, daß hierfür der mechanische Momentverschluß nicht ausreicht, wird man in f elektrisches Funkenlicht benutzen, von dessen Belichtungsdauer weiter unten die Rede sein soll.

Eigentliche kinematographische Aufnahmen eines und desselben rasch verlaufenden Schlierenvorgangs hat, soviel uns bekannt geworden ist, zuerst A. Miethe ausgeführt; Miethe hat den Ausbruch von Sonnenprotuberanzen kinematographiert, und zwar mit der in der gewöhnlichen Kinematographie üblichen Bilderfolge von 17–20 Teilbildern in der Sekunde. Eine größere Frequenz von Schlierenbildern, nämlich eine solche von mehr als 1000 Teilbildern in der Sekunde, scheint in der Schlierenkinematographie bisher nicht erzielt worden zu sein.

Der Zweck des vorliegenden Aufsatzes ist, an einem durchgeführten Beispiel die von uns angewendete Methode zu erläutern, die es ermöglicht, auch solche hochfrequenten Schlierenkinematographien zu erzeugen. Das Beispiel bezieht sich auf die Explosion eines Leuchtgas-Luftgemisches bei der Zündung durch den elektrischen Funken: Aus einem Bunsenbrenner strömt das Gasgemisch aus; läßt man hart über der Mündung des Brenners einen elektrischen Induktionsfunken überspringen, so hört man einen leichten Explosionsknall; scheinbar momentan entzündet sich die Flamme; es werde gefragt, welche Zeit vergeht, bis die Bunsenflamme eine bestimmte Höhe erreicht hat.

Zur kinematographischen Aufnahme wurde der Cranzsche ballistische Kinematograph benutzt¹⁾, der von 1909 ab bis zur Auflösung der militär-technischen Akademie (Oktober 1919) zu mancherlei ballistischen Untersuchungen Verwendung gefunden hatte²⁾ und der normal 5000 Teilbilder in der Sekunde liefert. (Je nach der Stärke der Erregung und der Windungszahl des gewählten Induktors können auch 2500 Bilder in der Sekunde gewonnen werden; diese letztere Frequenz reichte im vorliegenden Falle völlig aus.) Der Hauptteil davon ist eine von der Firma H. Boas in vorzüglicher Weise konstruierte Wechselstrommaschine W (vgl. die schematische Fig. 1). Die Wechselströme werden durch die Primärwicklung p eines Boasschen Resonanzinduktors geleitet. Im Sekundärkreis befindet sich die Sekundärwicklung s und ein Drehkondensator C mit der dazu parallel geschalteten Beleuchtungsfunkstrecke f. Die Funkenstrecke f wird dauernd mit Druckluft angeblasen, wodurch die ionisierte Luft immer wieder durch frische Luft ersetzt

¹⁾ Beschrieben in der Deutschen Mechanikerzeitung, Jahrgang 1909, Heft 18, S. 173; ferner in der Ztschr. f. d. ges. Schieß- u. Sprengstoffwesen, herausgeg. von Dr. Escales, München, 4, 321 [1909]; und besonders eingehend in der Broschüre von B. Glatzel, „Elektrische Methoden der Momentphotographie“, Verlag von Vieweg, Braunschweig 1915, S. 85 ff. Die andere, im Jahr 1912 zusammen mit B. Glatzel konstruierte Kinematographeneinrichtung, die eine Bilderfolge von rund 100 000 Teilbildern in der Sekunde ergeben hatte, konnte bei unseren jetzigen Versuchen keine Verwendung finden, da bei den damals benutzten Dimensionen der Einrichtung die Lichtstärke der Beleuchtungsfunktion nicht ausgereicht hätte. Über diese letztere Einrichtung vgl. die Verbandl. d. (Deutschl.) Physik. Gesellsch.: „Die Verwendung von Gleichstrom-Löschenfunkstrecken zur kinematographischen Aufnahme von ballist. u. physik. Vorgängen“ 14, Nr. 10, 525 ff. [1912].

²⁾ Vgl. das Lehrbuch der Ballistik, Verlag von B. G. Teubner in Leipzig, Band IV (Tabellen, Diagramme und Photographien), 2. Aufl. 1918.

und die Helligkeit der Beleuchtungsfunkens f wesentlich erhöht wird. Das Licht dieser Beleuchtungsfunkens f fällt auf einen vorderseitig versilberten sphärischen Zeissischen Hohlspiegel von 7 m Brennweite und geht, an dem Hohlspiegel reflektiert, nach dem Objektiv O . Auf der Mitte des Objektivkopfes O lässt man die von f ausgehenden Licht-

Filmenden mit Eisessig geklebt ist, lässt man die Motoren der Wechselstrommaschine und der Filmtrommel anlaufen. Sind die normalen Tourenzahlen erreicht und genügend konstant geworden, so setzt man das Druckluftgebläse zum Anblasen von f in Gang, lässt das kalte Leuchtgas-Luftgemisch aus dem Brenner ausströmen und schaltet den sekundären Wechselstrom ein. Die Beleuchtungsfunkens gehen jetzt bei f über, während jedoch das Fallbrett in der gehobenen Stellung vorerst noch verbleibt und die Filmtrommel noch verdeckt. Sobald der Ton der in rascher Folge übergehenden Beleuchtungsfunkens – eventuell auf ein Verstellen des Drehkondensators C hin – ein gleichmäßiger geworden ist, lässt man das Fallbrett herabfallen; der Öffnungsschlitz geht an der Filmtrommel vorbei; der Induktionsfunke bei A entzündet dabei das Gasgemisch, und der Film wird belichtet. Nach einem Filmumlauf ist die Trommel wieder verdeckt. Wenn die

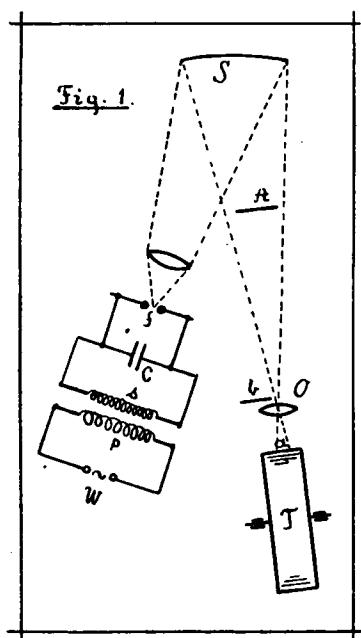


Fig. 1.

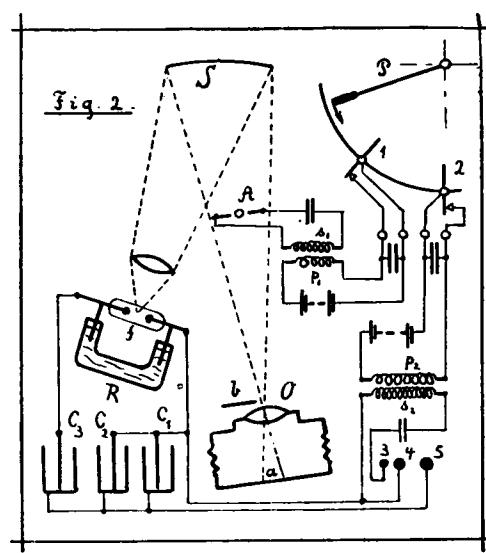


Fig. 2.

strahlen sich vereinigen, so daß dort das helle objektive Bild der Funkenstrecke f zu sehen ist. Hinter dem Objektiv O befindet sich die Filmtrommel T , die beim Versuch dauernd rotiert. Der Abstand der Trommel T vom Objektiv O wird so gewählt, daß eine Schliere A , die innerhalb des Lichtkegels OS auftritt, auf dem Trommelmumfang in a sich scharf abbildet. Im vorliegenden Fall entstand die Schliere A durch die Flamme eines Bunsenbrenners; die Länge des Brennerrohrs war 10 cm, der äußere Durchmesser des Rohrs 11 mm, der innere 9 mm; die zwei Löcher für den Luftzutritt hatten einen Durchmesser von 6 mm. Die scharfkantige Schlierenblende, die unmittelbar vor dem Objektiv O so weit vorgeschoben werden muß, daß einerseits das Bild a der Schliere genügend deutlich zutage tritt, und daß andererseits nicht zu viel Licht abgeblendet wird, ist in der Fig. 1 mit b bezeichnet. Der Film ist, falls 400–500 sukzessive Teilbilder desselben Schlierenvorganges gewünscht werden, über zwei Trommeln gespannt, die durch zwei synchron laufende Motoren angetrieben werden, und hat alsdann eine Länge von 7–8 m; im vorliegenden Fall genügten 50–60 Teilbilder desselben Bewegungsvorganges; daher wurde aus Gründen der Filmersparnis eine einzige Trommel T von 160 cm Umfang verwendet.

Durch ein mit verstellbarer Schlitzöffnung versehenes Fallbrett, das dicht vor dem Objektiv O und der Schlierenblende b aufgestellt ist (in der Fig. 1 nicht gezeichnet), ist dafür gesorgt, daß der Film nicht öfter als während eines einzigen Filmumlaufs von den Beleuchtungsfunkens f belichtet wird. Dieses Fallbrett erfüllt außerdem zwei weitere wichtige Zwecke: Erstens kann ein Auslösekontakt der im Primärkreis eines Funkeninduktors liegt, an dem Fallbrett so verstellt werden, daß in der über der Brenneröffnung bei A befindlichen Zündungs-Funkenstrecke der Induktionsfunke nicht zu früh und nicht zu spät, sondern im Anfang der gewünschten Bilderfolge übergeht und das ausströmende Leuchtgas-Luftgemisch entzündet. Zweitens ist mit dieser Anordnung am zweckmäßigsten eine Gleichmäßigkeit der Funkenfolge f und damit eine Gleichmäßigkeit der kinematographischen Bilderfolge gewährleistet: Nämlich unmittelbar nach dem Einschalten des Sekundärkreises sC der Wechselstrommaschine folgen sich meistens die Beleuchtungsfunkens f in mehr oder weniger unregelmäßigen Zeitabständen; lässt man dagegen die Beleuchtungsfunkens bei f schon einige Sekunden vor dem eigentlichen Versuch übergehen und benutzt das Licht dieser Funken zur Belichtung des Films erst dann, wenn man bei leichtem Verstellen des Drehkondensators C einen gleichmäßig hellen Ton der Funken hört, so erhält man eine Bilderfolge von außerordentlicher Regelmäßigkeit.

Ein Versuch vollzieht sich danach wie folgt: Nachdem alles, insbesondere auch die Schlierenblende b richtig eingestellt, der Film bei rotem Licht über die Trommel gespannt und an den vorstehenden

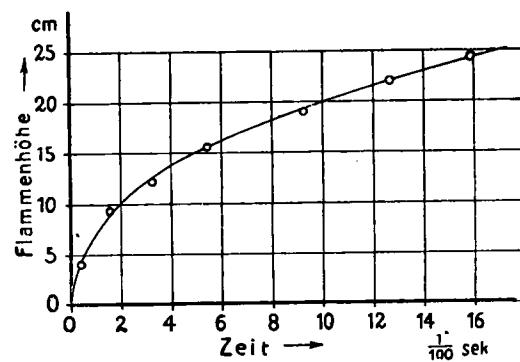


Fig. 3.

Trommel T zur Ruhe gekommen ist, wird der Film an der Klebestelle aufgeschnitten, entwickelt und fixiert.

Das Resultat einer solchen kinematographischen Aufnahme ist in Bild 4 wiedergegeben. Natürlich konnten nicht alle 50 Teilbilder einer Aufnahme in dieser Zeitschrift reproduziert werden; vielmehr sind nur

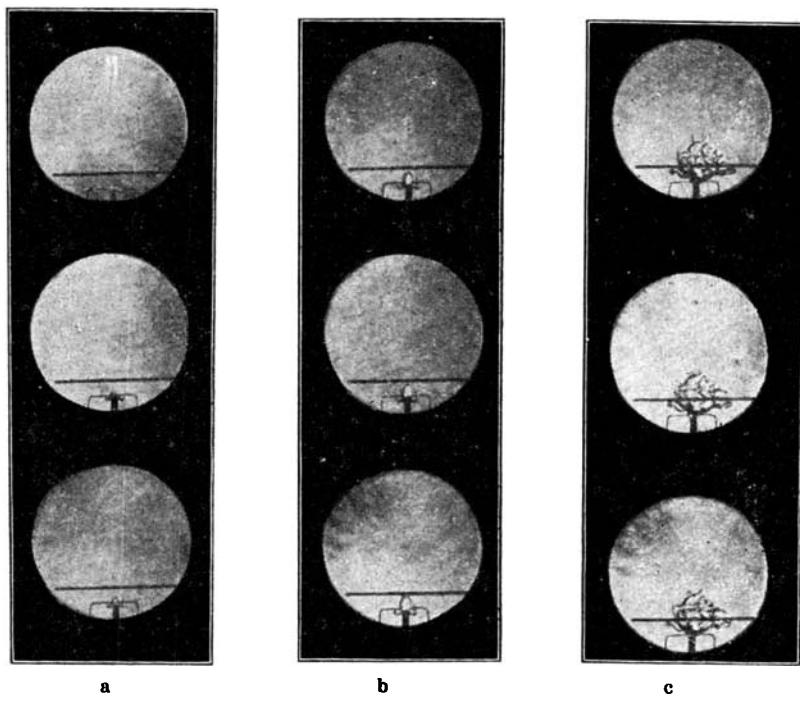


Fig. 4.

drei kleine Ausschnitte $4a$, $4b$ und $4c$ (von je drei aufeinanderfolgenden Teilbildern) hier dargestellt; der Ausschnitt $4a$ mit den drei ersten Bildern bezieht sich auf das Anfangsstadium einer solchen Aufnahme; der Ausschnitt $4b$ auf das mittlere; der Ausschnitt $4c$ auf das spätere Stadium der Entflammung. Auf dem ersten Bild von $4a$ ist oben das Bild des Zündfunkens zu erkennen; es wäre nur ein sehr unwahrscheinlicher Zufall gewesen, wenn das Auftreten dieses Zündfunkens mit dem Auftreten eines der Beleuchtungsfunkens f zusammengefallen wäre (dann wäre das Bild des Zündfunkens auf das betreffende Kinematographenbild, und zwar gerade auf das Bild der Zündfunkensstrecke über der Brenneröffnung gefallen); tatsächlich ist die Zündung ein kurzes Zeitintervall vor dem Entstehen des ersten Kinematographen-

bildes von 4a erfolgt; übereinstimmend damit ist auf diesem ersten Bild bereits die erste Ausbildung der Flammenschliere wahrzunehmen.

Jedes einzelne Bild ist kreisförmig, weil der Zeiß'sche Hohlspiegel eine kreisförmige Umröhrung besitzt und weil die einzelnen Kreise nichts anderes sind als die Bilder des Hohlspiegels. Innerhalb dieser Kreise sieht man das Bild des Bunsenbrenners A mit der Zündungsfunkentstrecke; über dem Brenner ist eine 3 cm breite horizontale Eisenschiene angebracht; dies geschah, um die Ausmessung der Bilder zu erleichtern und weil an der Schiene das Abrollen der Wirbel besonders deutlich wahrzunehmen war. Die Negative sind zwar gegenüber der Gegenstandsgröße stark verkleinert, aber genügend scharf, so daß eine mikroskopische Ausmessung möglich ist.

Flasche wird ein Induktionsstrom erzeugt, der in der Brennerfunkentstrecke bei A übergeht; das Gasgemisch wird hierdurch entzündet. Bei der Fortsetzung seines Weges schlägt das Pendel gegen den zweiten Auslösekontakt 2. Durch die Öffnung dieses zweiten Kontaktes wird in dem Sekundärkreis eines zweiten Induktionsröhrens derselben Art (Primärspule p_1 , Sekundärspule s_2) ein Induktionsfunke in der Funkentstrecke 3—4 erzeugt; dies hat zur Folge, daß die Leydener Batterie $C_1 C_2 C_3$, die vorher mittels einer Influenzmaschine aufgeladen worden war, entladen wird und daß zwischen 4 und 5 der Entladungsfunkens, bei f der Beleuchtungsfunkens übergeht; durch das Licht des letzteren Funkens wird das Bild der Flammenschliere erzeugt.

Die zugehörige gesamte Schaltung, die dazu dient, mit Hilfe eines

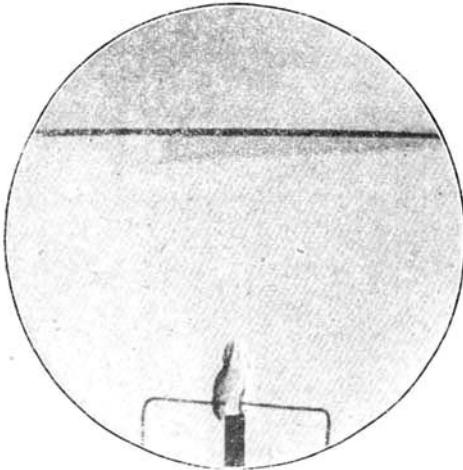


Fig. 5.

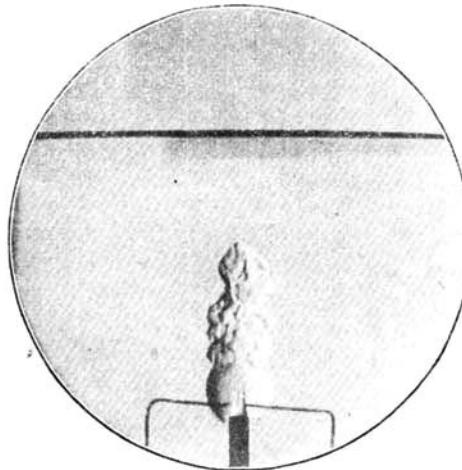


Fig. 6.

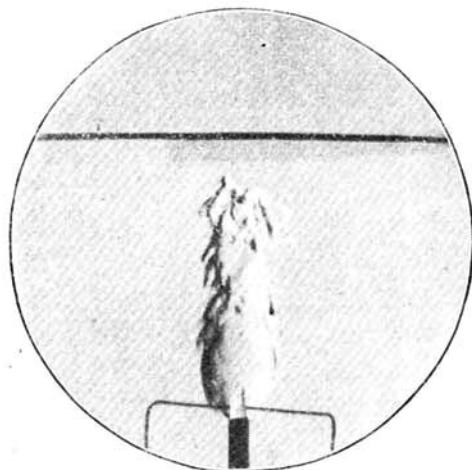


Fig. 7.

Außer dieser eigentlichen kinematographischen Aufnahme haben wir noch eine Serie von größeren sukzessiven Bildern desselben Schlierenvorganges, nämlich von solchen in halber Gegenstandsgröße, in Einzelaufnahmen vom Format 13/18 cm mit dem gleichen Brenner und der gleichen Brenner-Einstellung erzeugt; dies geschah mit Hilfe eines geeignet modifizierten Helmholtzschen Pendelunterbrechers P (vgl. Fig. 2), der früher zu ballistischen Zwecken in dem Institut hergestellt

schwachen Induktionsfunkens einen kräftigen und sehr kurz dauernden Batteriefunken auszulösen und die in Elektrikerkreisen wenig bekannt zu sein scheint⁴⁾), ist aus der schematischen Figur 2 zu ersehen. R ist ein Flüssigkeitswiderstand, der zur Beleuchtungsfunkentstrecke f parallel geschaltet ist. Man sieht, daß die Potentialdifferenz bei f und folglich der Funke bei f erst auftreten kann, nachdem die Entladung bei 4—5 stattgefunden hat. Die Funkentstrecke f ist so angeordnet, daß ein

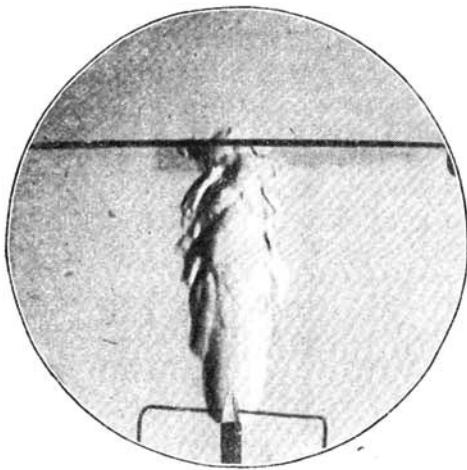


Fig. 8.

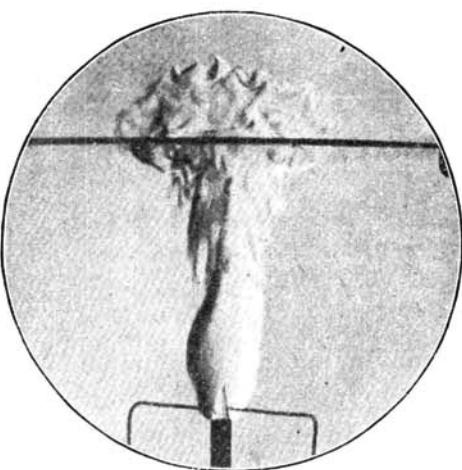


Fig. 9.

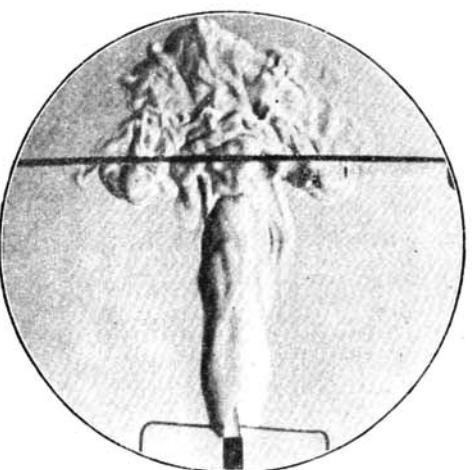


Fig. 10.

worden war³⁾): Vier Kreisschienen tragen vier Edelmannsche Unterbrechungskontakte; von diesen Kontakten wurden bei unseren Versuchen zwei benutzt; nämlich der erste 1 (s. Fig. 2) zur Zündung des Gasgemisches, der zweite 2 zur Auslösung des Beleuchtungsfunkens f und damit zur Gewinnung des zugehörigen Schlierenbildes; indem nun der zweite Kontakt gegenüber dem ersten von einer Aufnahme zu der andern immer weiter verstellt wurde, konnten immer spätere Momente der Entflammung gewonnen werden. Im einzelnen vollzog sich eine solche Aufnahme folgendermaßen: Das Pendel P ist zunächst durch einen Elektromagneten in der Ausschlagstellung festgehalten. Wenn es losgelassen wird, schlägt es zuerst gegen den Kontakt 1; dadurch wird dieser Kontakt geöffnet und der die Primärspule p_1 eines Induktionsröhrens durchfließende Strom unterbrochen; zur Verminderung des Unterbrechungsfunkens ist parallel zum Kontakt 1 eine Kapazität geschaltet. Im Sekundärkreis mit der Sekundärspule s_2 und einer Leydener

„Springen“ des Funkens und damit eine störende Änderung in der Lage des Funkenbildes gegenüber der scharfen Kante der Schlierenblende b am Objektivkopf O vermieden ist: In ein sehr enges Capillarröhrchen aus Quarz sind beiderseits die dünnen Kupfer- oder auch Magnesiumelektroden eingeführt (Gretsch'sche Funkenstrecke); hierdurch ist ein seitliches Ausspringen des Beleuchtungsfunkens unmöglich gemacht; für die Schlierenphotographie ist dies von besonderer Wichtigkeit. Die Trommel T, die zur eigentlichen Kinematographie verwendet worden war (Fig. 1), ist jetzt durch eine feststehende photographische Kamera ersetzt (Fig. 2). Auf diese Weise entstand die Serie der Bilder Nr. 5—12. Weiter zeigt Bild Nr. 13 die Flammenschliere für den schließlichen Endzustand, also für den Fall, daß das Gas schon längere Zeit vorher entzündet worden war. Die Öffnungen für den

⁴⁾ Beschrieben in dem Lehrbuch der Ballistik, Band III (experimentell Ballistik), Leipzig, bei B. G. Teubner, 1913, S. 247 u. 249; besonders eingehend auch bei B. Glatzel, elektrische Methoden der Momentphotographie Braunschweig, bei Vieweg, 1915, S. 22 u. 63.

³⁾ In der obenerwähnten Broschüre von B. Glatzel, S. 12, findet man eine Photographie dieses „Vierschienenpendels“.

Luftzutritt am Fuß des Brennerrohres waren bei diesen Aufnahmen Nr. 5–13 durchweg auf die kleinste Höhe des inneren Brennkegels eingestellt. Nr. 14 zeigt die Flammenschlire für eine andere Kegelstellung. Nr. 15 ist das Bild der Flamme für den Fall, wo die Flamme nach unten „durchgeschlagen“ war. Und Nr. 16 soll die Wirkung der Schlierenblende demonstrieren: Nr. 16 ist ohne jede Schlierenblende aufgenommen; nur auf dem Negativ ist die Bunsenflamme schwach sichtbar. Die Aufnahme Nr. 17 endlich bezieht sich auf das Einfallen eines Schwefelsäuretropfens in Wasser; die Tropfen fielen aus einer Capillaren zunächst in ein Schälchen, das mittels einer Stange an dem Anker eines Elektromagneten befestigt war; im gegebenen Moment wurde das Schälchen durch Stromunterbrechung und folglich

0,23%, bei der Messung eines Intervalls von etwa 2 tausendst Sekunden einen wahrscheinlichen Fehler der Einzelmessung von 25 millionst Sekunden oder von 1,15% aufwies; diese große Gleichmäßigkeit der Messungen war ein Beweis für die Exaktheit sowohl des Boulengé-Zeitmessers, als auch des Pendelkomparators.

Ferner sei darauf hingewiesen, daß die Verwendung des Induktoriums jedenfalls eine Verzögerung zur Folge hat, d. h. es vergeht eine gewisse Zeitdifferenz von dem Moment ab, wo der betreffende Stromunterbrechungskontakt durch das Pendel abgehoben wird, bis der Funke auftritt. Diese Verzögerung ist sehr klein; sie konnte früher dadurch ermittelt werden, daß ein Infanteriegeschoss, dessen Geschwindigkeit wohlbekannt war, einen Draht durchriß und damit den Primär-

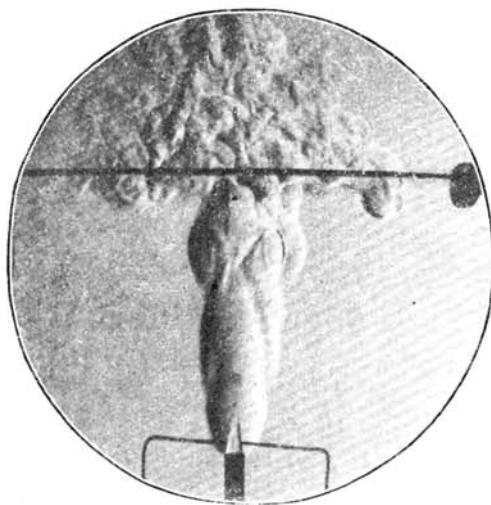


Fig. 11.

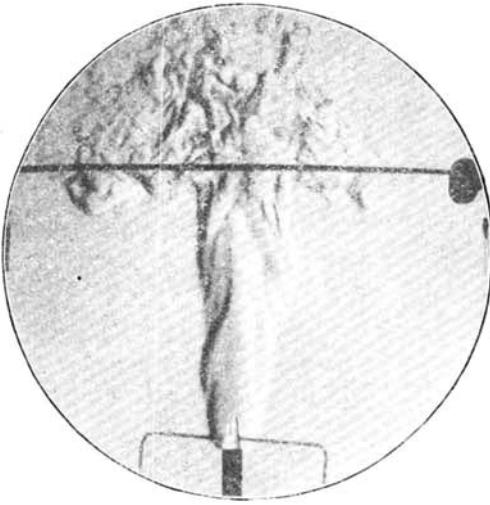


Fig. 12.

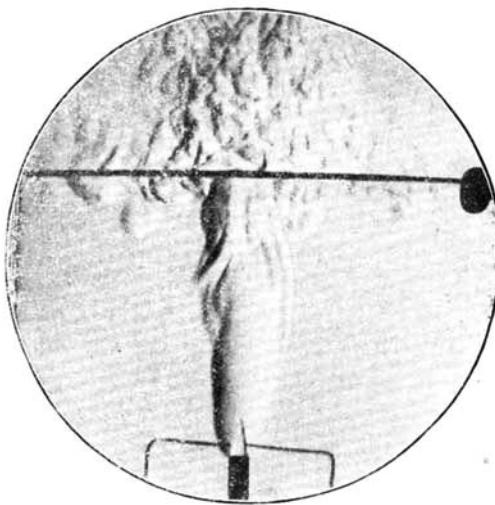


Fig. 13.

Abheben des Elektromagneters nach der Seite gerückt, und der Tropfen fiel alsdann in das Wasser.

Die Zeitintervalle, die bei der kinematographischen Schlierenaufnahme der Bunsenflamme (vgl. Fig. 4) von dem Augenblick der Zündung ab vergehen, bis die Flammenschlire die aus den betreffenden Schlierenbildern sich ergebenden Höhen erreicht hat, folgen ohne weiteres aus der gemessenen Tourenzahl der Filmtrommel T und den Abständen

strom des Induktoriums unterbrach und daß der auftretende Funke zur Photographie des fliegenden Geschosses verwendet wurde; auf der photographischen Platte war dann der durchschossene Draht und wenige Zentimeter dahinter das fliegende Geschoss zu sehen. Im vorliegenden Fall waren gleichartige Induktorien benutzt; folglich heben sich die betreffenden Verzögerungen bei der Messung jener Zeitdifferenzen sehr angenähert auf.

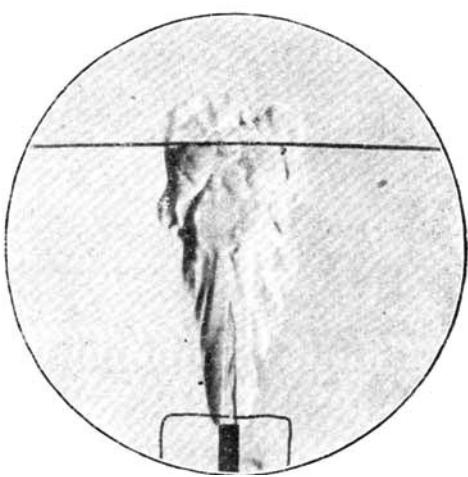


Fig. 14.

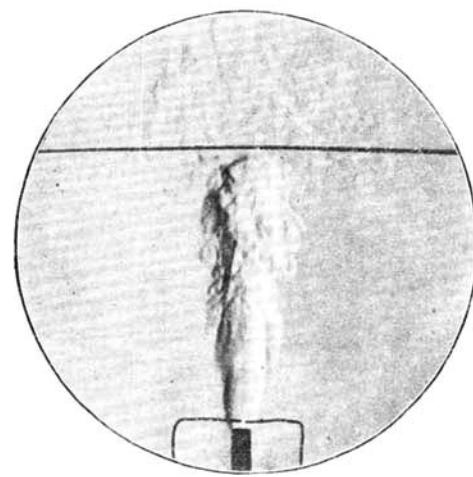


Fig. 15.

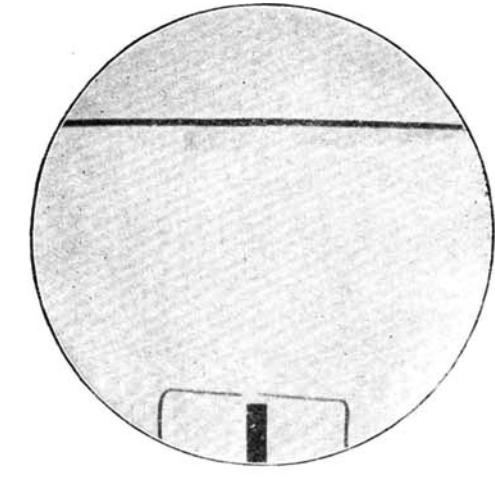


Fig. 16.

der Bilder des Zündungsfunkens einerseits und der Zündungsfunkensstrecke anderseits.

Dagegen bei der Serie Nr. 5–12 von Einzelbildern, die mit Hilfe des Pendelkomparators gewonnen worden waren (Fig. 2), wurde die Messung der Zeitintervalle dadurch bewirkt, daß der Kontakt 1 des Pendelkomparators in den ersten, der Kontakt 2 in den zweiten Stromkreis eines Fallchronographen von le Boulengé⁵⁾ gelegt wurde.

Betreffs der Genauigkeit dieser Messungen sei erwähnt, daß mit demselben Pendelkomparator und demselben Boulengé-Zeitmesser früher je 10 Zeitmessungen bei verschiedenen gegenseitigen Kontaktstellungen 1 und 2 ausgeführt worden waren; es hatte sich dabei ergeben, daß bei der wiederholten Messung z. B. eines Zeitintervalls von etwa 0,016 Sekunden der Boulengé-Zeitmesser einen wahrscheinlichen Fehler der Einzelmessung von 37 millionst Sekunden oder von

Was endlich die Dauer der jedesmaligen Belichtung der photographischen Platte durch das Licht eines einzelnen Beleuchtungsfunkens f betrifft (Fig. 2), so konnte für diese Funkendauer ebenfalls auf ballistischem Wege wenigstens eine Grenze gefunden werden: Wurde die Schaltung von Fig. 2 verwendet und dabei noch zwischen C₁ und f eine Selbstinduktion und zwischen 5 und C₃ ein großer Wasserwiderstand eingeschaltet, so ergab sich, falls mit Hilfe des Funkens f das Bild eines Gewehrgeschosses aufgenommen wurde, das mit einer Geschwindigkeit von nahezu 1000 m/sec. durch das Gesichtsfeld flog, bei einer Photographie des Geschosses in angenähert natürlicher Größe eine Unschärfe am vorderen und hinteren Ende des Geschossbildes, die ebenfalls kleiner war als 1/10 mm (vgl. betreffs solcher Aufnahmen die Tafel am Schluß von Band I des Lehrbuchs der Ballistik, 3. Aufl., Leipzig, bei Teubner, 1918); also war die Dauer des Beleuchtungsfunkens (was die chemisch-photographische Wirkung des Funkens betrifft) keinesfalls größer als etwa 1/10 millionst Sekunden.

Das Ergebnis der erwähnten Zeitmessungen an den Bildern Nr. 5

⁵⁾ Beschrieben in dem Lehrbuch der Ballistik, Bd. III, 1913, S. 54–63; über die Prüfung für Genauigkeit vgl. S. 110.

bis 11 (bei Nr. 12 reichte der Boulengé-Zeitmesser nicht mehr aus) war das folgende: Identifiziert man die augenblickliche Schlierenhöhe mit der augenblicklichen Flammenhöhe, so ist, von dem Moment der Zündung ab gerechnet, nach 0,0041 0,0158 0,0315 0,0545 0,0925 0,1264 0,1587 Sek. die Flammenhöhe 4,0 9,3 12,4 15,6 19,0 22,0 24,4 cm

Diese (nicht ausgeglichenen) Messungen sind in dem Diagramm Nr. 3 graphisch dargestellt. Es ist danach z. B. die Flammenhöhe 15,0 cm geworden, d. h. es ist die um 15 cm über der Brennermündung angegebene achte Eisenschiene von der Flamme erreicht nach 0,050 Sek. vom Augenblick der Zündung ab.

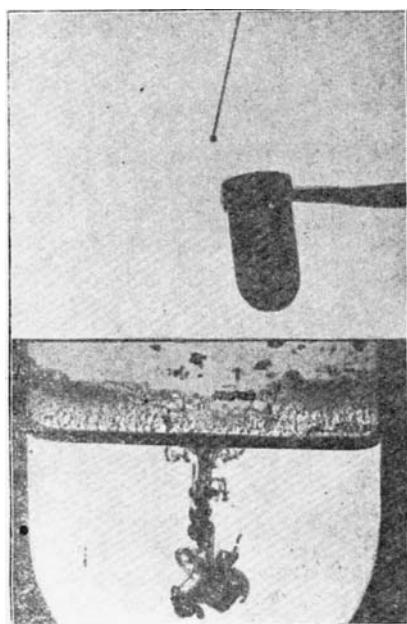


Fig. 17.

Die Theorie der Bunsenflamme ist von F. Haber⁶) und besonders eingehend von H. Mache⁷) behandelt worden. Haber untersucht die Temperaturverhältnisse in den verschiedenen Teilen der Flamme, dem „Innenkegel“ und dem „Außenkegel“, und die chemische Beschaffenheit der dort vorhandenen Gasmengen. H. Mache erörtert das Verhältnis der Verbrennungsgeschwindigkeit c und der Strömungsgeschwindigkeit u , wie es aus dem halben Öffnungswinkel α des Innenkegels mittels

$$c = u \cdot \sin$$

zu erhalten sei, ferner die Entstehung des aufrechten und des umgekehrten Verbrennungskegels, die Theorie der Brennfläche, das Durchschlagen der Flamme, den Gouyschen Satz usf. und bespricht die Arbeiten von Ubbelohde, Kölleker, Dommer, Knudsen, Wood, Michelson, Bunte, Lenard, Becker, Gold und Andrade über den Bunsenbrenner. Alle näheren Einzelheiten möge der Leser bei H. Mache nachsehen. Für uns war, wie eingangs erwähnt, der Hauptzweck die Demonstration der angewendeten experimentellen Methode, und wir überlassen es den Herren Explosionschemikern, zu entscheiden, ob diese Hochfrequenz-Schlieren-Kinematographie für ihre Untersuchungszwecke eine Verwendung finden kann.

[A. 16.]

suchsbedingungen, ob man größere oder kleinere Pulvermengen in der Versuchsbombe verschiebt, einen wechselnden Gehalt an Methan und Kohlensäure sowie verschiedene Verbrennungswärmen. Diese Tatsachen sind durch die während des Abkühlungsprozesses verlaufenden Reaktionen veranlaßt. Die bei der maximalen Temperatur, der Verbrennungstemperatur, entstehenden Gase kühlen sich je nach der Menge des verschossenen Pulvers mit verschiedener Geschwindigkeit ab, wobei sich einerseits das Wasserglas-Gleichgewicht verschiebt und anderseits je nach dem Druck und der Abkühlungsgeschwindigkeit sich mehr oder weniger Methan bildet. Die Methanmengen schwanken beim Nitrocellulosepulver zwischen $\frac{1}{2}\%$ und 15%, die der Kohlensäure zwischen 15 und 30%, je nach der Pulverart. Die beiden angedeuteten Reaktionen verlaufen aber unter positiver Wärmetönung; so kommt es, daß man bei verlangsamter Abkühlungsgeschwindigkeit, bei der die gebildeten gasförmigen Produkte in starkem Umfang weiter reagieren können, neben veränderter Gaszusammensetzung steigende Verbrennungswärme findet. Die Differenz kann bis über 150 Calorien ausmachen. Ein Beispiel mag diese Anführungen beweisen:

Ein Infanteriepulver unter verschiedenen Bedingungen, einmal mit der Ladedichte 0,1, das andere Mal mit der Ladedichte 0,5 verschossen, ergab für Q die Werte 802,4 und 977,7 Cal. Die Gaszusammensetzung änderte sich von 14,85% Kohlensäure und 34,8% Kohlenoxyd zu 30,56% Kohlensäure und 20,71% Kohlenoxyd, während das Methan von 0,29% auf etwa 9% stieg.

Die frühere Annahme, daß das Pulver sich je nach der Ladedichte in verschiedener Weise zersetzt, steht mit den Gesetzen der Thermodynamik nicht im Einklang und ist nicht mehr haltbar. Den Beweis kann man sehr einfach liefern. Das Methan ist bei den Temperaturen der Verbrennung des Pulvers gar nicht beständig. Erhitzt man Versuchsgemische mit starkem Methangehalt und sorgt für schnelle Abkühlung der erhitzten Produkte, so ändert sich die Gaszusammensetzung, das Methan verschwindet, und ebenso nimmt die Menge der Kohlensäure ab, während das Kohlenoxyd sich vermehrt. Schießt man in einer Methanatmosphäre, so zersetzt sich dieses, und die bei schneller Abkühlung entstehenden Zersetzungprodukte stellen sich vollkommen nach den Bedingungen des Wassergleichgewichts ein, nur ganz geringe Methanmengen, die nicht 1% erreichen, kann man noch finden. Diese Menge entspricht der nach der Nernstschen Näherungsformel errechneten Beständigkeit des Methans. Bei einer Temperatur von 2000 Grad ist die Gleichgewichtskonstante $k = 10^8$; auch bei Partialdrucken von rund 2000 at für Kohlenoxyd und 700 at für Wasserstoff und Wasser sind danach nur etwa 0,04% Methan beständig.

$$p_{\text{CH}_4} = \frac{2000 (700)^8}{700 \cdot 10^8} = 1 \text{ at.}$$

Ein weiterer praktischer Beweis für die Unbeständigkeit des Methans bei der Zersetzungstemperatur des Pulvers ist von Muraour¹⁾ erbracht worden, der die primären Verbrennungsprodukte des verschossenen Pulvers bei hohem Druck durch enge Düsen, die sich erst bei bestimmten Drucken öffnen, in ein zweites evakuiertes Gefäß abströmen ließ, wobei durch die Abkühlung in den engen Kanälen das Gleichgewicht der Gase nahe bei der Explosionstemperatur erstarnte, und so die sekundären Reaktionen verringert waren. In der eigentlichen Bombe ohne Kanäle war ein Gasgemisch enthalten, in dem sich reichliche Mengen von Methan wegen der langsamen Abkühlung vordanden, 4,04%, wurden die Gase aber beim Durchtritt durch die Kanäle und die Entspannung gekühlt, so konnte nur 0,78% Methan nachgewiesen werden.

Will man sich also beim Pulver freimachen von zufällig durch die wechselnde Abkühlungsgeschwindigkeit herbeigeführten sekundären Reaktionen, so muß man letztere, wenn man sie nicht ausschalten kann, doch rechnerisch rückgängig machen und erhält so die wirkliche oder wahre Gaszusammensetzung und Verbrennungswärme, die der üblichen Zersetzung des Pulvers in der Waffe entspricht und konstant ist.

Das Rückgängigmachen der sekundären während der Abkühlungsperiode verlaufenden Reaktionen kann praktisch weiter von Vorteil sein, wenn es sich darum handelt, die Frage zu lösen, ob zwei an verschiedenen Stellen durchgeführte Untersuchungen sich auf das gleiche Pulver beziehen. Es sei z. B. an einem Orte bei der Untersuchung eines bestimmten Pulvers die unter I angeführte Gaszusammensetzung gefunden worden, während an anderer Stelle die unter II ermittelt wurde.

	I.	II.
$\text{CO}_2 = 19,99\%$	30,56%	
$\text{CO} = 30,50\%$	20,71%	
$\text{H}_2 = 18,23\%$	9,94%	
$\text{CH}_4 = 2,86\%$	8,96%	
$\text{N} = 12,43\%$	13,36%	
$\text{H}_2\text{O} = 15,99\%$	16,49%	
$\text{Vo}(\text{H}_2\text{O}) = 919,5 \text{ ccm}$	810 ccm	
$(\text{Dampf})\text{Q} = 974,7 \text{ cal}$	1132,5 cal (Wassergasförmig)	

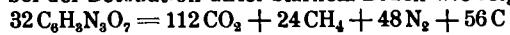
¹⁾ Comptes rendus t. 168 p. 995.

Über die Zersetzung von Explosivstoffen.

Von Prof. Dr. OTTO POPPENBERG.

Aus dem Sprengstoff-Laboratorium der Techn. Hochschule Charlottenburg.

Während des Weltkrieges haben die Sprengstoffe eine ungeahnte Produktionssteigerung und Verwendung gehabt; die zur Detonation gebrachten Mengen sind gewaltig, und doch kennt man bisher den Detonationsvorgang und die bei der Detonation entstehenden Produkte nur sehr unvollkommen. Die bisherigen Untersuchungen haben alle kein richtiges Bild ergeben, weil unter den Versuchsbedingungen in der Bombe das entstehende Gasgemisch während der Abkühlungsperiode noch weiter reagieren konnte, und so eine willkürliche Gaszusammensetzung ergab, die durch die zufälligen Versuchsbedingungen bestimmt wurde. So sind in der Literatur die mannigfaltigsten Angaben über die Zersetzung der Pikrinsäure enthalten. Nach Sarrau soll sie sich bei der Detonation unter starkem Druck wie folgt zersetzen:



Bei geringerem Druck:

$32 \text{ C}_6\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_7 = 50 \text{ CO}_2 + 122 \text{ CO} + 19 \text{ CH}_4 + 48 \text{ N}_2 + 32 \text{ H}_2\text{O} + 8 \text{ H}_2 + \text{C}$

Das Experiment, ohne Benutzung der modernen Thermodynamik, kann auf diesem Gebiete keine Klarheit geben. Diese Tatsache ist bereits in der Zeitschrift für Schieß- und Sprengstoffwesen, Jahrg. 1910, erörtert. Bei Pulvern ist gezeigt worden, daß die Zersetzung durch das Wassergas-Gleichgewicht eindeutig bestimmt wird, und daß sich die Gaszusammensetzung der Explosionsprodukte nach diesem aus der elementaren Zusammensetzung unter Benutzung der angegebenen Formeln leicht ermitteln läßt. Beim praktischen Versuch findet man je nach den Ver-

⁶⁾ F. Haber, Thermodynamik technischer Gasreaktionen, 1905, S. 282 ff.

⁷⁾ H. Mache, Die Physik der Verbrennungserscheinungen, Leipzig, bei Veit, 1918, S. 25—54.