

Beobachtungen

nach einer neuen optischen Methode.

Ein Beitrag zur Experimental-Physik

von

Dr. August Toepler,

Docent der Physik und Chemie an der Königl. landwirthschaftlichen Academie in Poppelsdorf.

Mit 4 lithographirten Tafeln.



Bonn,

Max Cohen & Sohn.

1864.

Seinem hochverehrten Freunde

Herrn Professor Dr. Ernst Nauck,

Director der polytechnischen Schule in Riga,

der Verfasser.

Einige hochschulische Vorträge

Herrn Professor Dr. Ernst Meißner

Lehrer der Philosophie an der Universität zu Bonn

in Bonn

Es gibt eine grosse Zahl von Vorgängen und Veränderungen im Innern durchsichtiger Medien, welche sich der directen Beobachtung durch das Auge oder die bis jetzt gebräuchlichen optischen Instrumente entziehen, weil jene Vorgänge sehr häufig eine fast verschwindende Wirkung auf den Gang der Lichtstrahlen ausüben, welche das Medium durchlaufen. Es gehören hierhin die Diffusions-Bewegungen farbloser Flüssigkeiten und Gase, die Dichtigkeits-Veränderungen durchsichtiger Körper von verschiedener Aggregatform, sei es durch Wärme oder Druck, Schallschwingungen u. s. w. Offenbar bedarf es nur einer zuverlässigen Methode, sehr kleine Schwankungen der Brechungsverhältnisse unmittelbar sichtbar zu machen, um die oben erwähnten Vorgänge in den Bereich der directen Beobachtung zu ziehen.

Bereits im Jahre 1859 beschäftigte ich mich mit einem sehr nahe verwandten Problem von allerdings mehr technischer, als wissenschaftlicher Bedeutung, mit einer einfachen Methode nämlich, in den zu optischen Zwecken bestimmten Gläsern mit ebenen oder sphärischen Begränzungsflächen die sogenannten Schlieren zu erkennen. Schlieren nennt man bekanntlich bei den optischen Gläsern Streifen und ganze Partien, welche von der Dichte der gesammten Glasmasse abweichen. Solche nicht durchaus homogene Glasmassen geben, namentlich zu Fernrohr-Objectiven von grösserer Brennweite verarbeitet, wegen der unregelmässigen Strahlenbrechung unklare optische Bilder, welche starke Vergrösserungen nicht vertragen.

Es ist ferner bekannt, wie namentlich die Herstellung grösserer, durchaus reiner Flintglasstücke sehr schwierig ist. Der Fabrikant schleift die durch wochenlange, sorgfältige Arbeit erzeugte, solide Glasmasse an zwei gegenüberliegenden Seiten plan und erhält dadurch, soweit es der Augenschein zulässt, Kenntniss von der Lage der nie ganz fehlenden Schlieren und Streifen. Nur die homogenen Regionen werden herausgeschnitten, und weiter zu Linsen verarbeitet. Nun kann man sich leicht davon überzeugen, dass diejenigen Schlieren, welche nur um Geringes von der Dichte der gesammten Masse abweichen,

dem blossen Auge verborgen bleiben, selbst wenn die bekannten, bei den practischen Optikern üblichen Kunstgriffe zur Anwendung gebracht werden; dahin gehört das Einfallenlassen von Sonnenstrahlen in die Glasmasse unter schiefer Stellung gegen das beobachtende Auge. Auch lässt man wohl den Schatten eines von der Sonne beschienenen stabförmigen Körpers durch die Glasmasse hindurchfallen und beobachtet etwaige Ungleichförmigkeiten im sogenannten Halbschatten, welcher auf einer mehre Fuss weit entfernten Fläche aufgefangen wird u. s. w. u. s. w. Allein es werden nicht selten Fernrohrobjective geschliffen, bei welchen man die auf obige Weise übersehenen Schlieren leider erst nach vollendetem Schliff daran erkennt, dass die Gläser zu stärkeren Vergrößerungen ganz untauglich sind. Ich habe mich sogar, wie unten gezeigt werden soll, überzeugt dass für die Reinheit der optischen Bilder grade diejenige Form der Schlieren die gefährlichste ist, welche man am leichtesten übersieht.

Es ist mir nun gelungen, mittels eines einfachen optischen Apparates derartige Ungleichförmigkeiten im Brechungsvermögen aufzufinden. Ich erkannte ferner, dass dieselbe Methode, in entsprechender Weise modifizirt, sich auch auf das Gebiet wissenschaftlicher Untersuchungen würde übertragen lassen, und zwar überall da, wo es sich um kleine Variationen in der Dichte oder dem Brechungsvermögen durchsichtiger Medien handelt. Der Erfolg entsprach meinen Erwartungen in solcher Weise, dass ich mich veranlasst sah, durch eine nicht geringe Zahl von eigenen Beobachtungen die Methode zu prüfen. Nachdem der Apparat im Laufe der Zeit mannigfache Umänderungen erfahren, darf ich meine Methode mit dem Wunsche veröffentlichen, dass sie sich als ein brauchbares Hilfsmittel der Experimental-Physik erweisen möge.

Princip der Beobachtungs-Methode.

§ 1. Die vorliegende Abhandlung hat zunächst eine möglichst eingehende Beschreibung der Methode und der nöthigen Apparate zum Zweck. Wenn ich hierbei mit grösserer Weitläufigkeit zu Werke gehe, als es zum blossen Verständniss des Verfahrens selbst erforderlich scheint, so hat dies darin seinen Grund, weil von der Correctheit in der Behandlung, Adjustirung etc. der Apparate meistens der Erfolg allein abhängt. Ich möchte zugleich einem Uebelstande vor-

beugen, welcher sich bei der Veröffentlichung neuer Beobachtungen leider gar häufig ereignet, dass nämlich richtige Beobachtungen von späteren Experimentatoren nicht bestätigt gefunden werden; sehr häufig, ja sogar in den meisten Fällen, lassen sich solche Differenzen auf ein abweichendes Beobachtungs-Verfahren zurückführen. Es mag hierin die vielleicht zu detaillirte Beschreibung meiner Methode ihre Entschuldigung finden. Den Schluss der Abhandlung soll die Mittheilung einiger Versuche bilden, welche sich mittels des Verfahrens leicht anstellen lassen.

Das Fundament, auf welchem die in Rede stehende Methode beruht, ist ein äusserst einfaches der Theorie nach. Stellen wir uns unter a (Fig. 1 Taf. I) einen helleuchtenden Punkt, vorläufig ohne räumliche oder Flächen-Ausdehnung vor, es sei ferner L eine Convexlinse von recht grosser Brennweite und Oeffnung, welche die von a ausgehenden Strahlen in b vereinigt, so wird man von der entgegengesetzten Seite her ein in der Linsen-Achse befindliches Auge O leicht so nahe an den Punkt b heranbringen können, dass die von b aus wieder divergirenden Strahlen sämmtlich durch die Pupille hindurch auf die Netzhaut gelangen können. (In der Fig. ist der Deutlichkeit halber auf das wahre Verhältniss der Dimensionen keine Rücksicht genommen worden.) Hat der Beobachter das Auge gleichzeitig so accommodirt, wie es der Entfernung von O bis L entspricht, so wird auf der Netzhaut ein deutliches Bild mn der Linse L entstehen müssen, welches durch die von a ausgehenden Strahlen vollkommen und gleichmässig erleuchtet erscheint. hc stellt eine gradlinig begränzte, undurchsichtige Scheidewand dar, welche wir vorläufig als nicht vorhandenen betrachten wollen.

Befindet sich nun im Innern der Linse bei gi etwa eine kleine Partie von beliebiger Gestaltung, deren Brechungsvermögen nur um Geringes von dem der Glasmasse abweicht, kurz eine Schliere, so werden die betreffenden Lichtstrahlen nicht genau in b eintreffen, sondern in der Nähe von b vorbeigehen, um ins Auge zu gelangen. Die unregelmässig gebrochenen Strahlen, beispielsweise gf und id , werden aber dennoch an der Stelle rs des Netzhautbildes anlangen, welche der Schliere ig entspricht, weil ja das Auge für die Entfernung der Linse accommodirt ist. Der Beobachter wird also trotz der unregelmässigen Strahlenbrechung das Gesichtsfeld gleichmässig erhellt sehen, falls das Diaphragma hc nicht vorhanden ist. Schiebt man dieses jedoch in der durch den Pfeil angedeuteten Richtung bis nahe zum Punkte b vor, so gibt es eine Stellung, bei welcher gewisse irreguläre Strahlen (id) abgeblendet werden. Dann muss in dem gleich-

mässig erhellten Gesichtsfelde mn eine dunkle Lücke s entstehen. In der That bemerkt man auf diese Weise im Allgemeinen eine schwarze Zeichnung der Schliere auf hellem Grunde.

Rückt das Diaphragma hc noch weiter vor, so dass der Sammelpunkt b grade selbst abgeblendet wird, so muss das Gesichtsfeld plötzlich dunkel werden. Dann gelangen aber noch andere irreguläre Strahlen (gf) unterhalb b ins Auge und erzeugen im Allgemeinen bei dieser Stellung des Diaphragmas ein helles Bild der Schliere auf dunklem Grunde.

Es ist nun einleuchtend, dass die letztere Anordnung, bei welcher b durch den scharfen Rand h des Diaphragmas abgeblendet wird, die empfindlichste Stellung zur Sichtbarmachung der Schlieren ist. Das erstere dunkle Bild auf hellem Grunde entgeht leicht der Beobachtung, weil sich bei intensiv beleuchtetem, grossem Sehfelde die Empfindlichkeit der Retina zu sehr abstumpft, während man hell auf dunklem Gesichtsfelde die zartesten Schlieren mit Leichtigkeit erkennt.

Der Augenblick, in welchem das allmählig vorgeschobene Diaphragma grade den Bildpunkt b erreicht, kennzeichnet sich beim Versuche sehr leicht dadurch, dass das helle Gesichtsfeld sich plötzlich verdunkelt, und zwar tritt die Verdunklung in allen Theilen des Sehfeldes gleichzeitig und gleichstark auf (natürlich von etwaigen Schlieren abgesehen). Passirt das Diaphragma nicht genau den Bildpunkt b , sondern geht um Geringes vor demselben vorüber, wie etwa in Stellung a Fig. 2, so wird das Auge eine partielle Verdunklung im Bilde mn erkennen. Hat die Diaphragmenkante die optische Achse erreicht, so ist das Gesichtsfeld halb hell, halb dunkel, und zwar dunkel auf der dem Schirme entgegengesetzten Seite. Das Umgekehrte tritt ein, wie sich leicht übersehen lässt, wenn das Diaphragma zwischen b und dem Auge steht. Beide Stellungen sind zur Schlieren-Erkennung nicht brauchbar. Die empfindliche Stellung ist nur die, bei welcher das Diaphragma grade durch b hindurchgeht. Der Kürze halber wollen wir für diese Stellung des Diaphragmas ein für alle Male die Bezeichnung »empfindliche Einstellung« beibehalten.

Obleich sich bei der practischen Ausführung des Versuches Manches ganz anders herausstellt, als es obige theoretische Erörterung lehrt, so wird man doch schon aus der Anordnung Fig. 1 erkennen:

1. dass die Schlieren im Innern der Linse L es nicht allein sind, welche dem Auge bei der obigen empfindlichen Einstellung sichtbar werden. Den Gang der Strahlen in der Nähe von b beeinflusst ja ebensosehr die Beschaffenheit des durchsichtigen Mediums, der Luft also, welche sich vor und hinter der Linse L Fig. 1 zwischen a und

b befindet. Da nun O für die Entfernung OL (beiläufig 15 bis 25 Fuss betragend) accommodirt ist, so wird es auch für die Luftschichten nahe vor und hinter der Linse hinreichend accommodirt sein, um in denselben partielle Veränderungen des Brechungsindex grade wie die Schlieren im Glase in wahrer Form und Grösse zu erblicken. Desgleichen wird man, wenn L als schlierenfrei vorausgesetzt ist, in einer vor (oder hinter) die Linse gestellten planen Glasplatte xy , einer Flüssigkeit in einem Gefäss mit durchsichtigen, planen Wänden, jede Ungleichförmigkeit im Brechungs-Vermögen direct wahrnehmen. Der Kürze halber soll in der Folge der Name »Schliere« für alle derartige Ungleichförmigkeiten im optischen Verhalten einer sonst homogenen Grundmasse beibehalten werden, beziehe er sich nun auf feste, flüssige oder gasförmige Medien.

2. Nicht allein solche Schlieren wird das Auge direct wahrnehmen. Auch jeden Fehler im Schliff der Linsenflächen bei L wird man in ähnlicher Zeichnung (hell auf dunkel oder umgekehrt) erblicken. Desgleichen Oberflächen-Veränderungen auf planen Platten, welche sich dicht vor, oder hinter L befinden.

3. Es ist darauf aufmerksam zu machen, dass für eine gewisse Einstellung des Diaphragmas hc ausnahmsweise dennoch Schlieren denkbar sind, welche durch das Auge nicht bemerkt werden können, und zwar, wie sich leicht einsehen lässt, nur in einem einzigen Falle.

Die obige Erörterung bezog sich auf irreguläre Strahlen, welche in einer zur Diaphragmen-Kante h senkrechten Ebene abgelenkt werden. Gesetzt es befinde sich in der Linse L eine Schliere, welche in Form eines Fadens von cylindrischem Querschnitt in der Richtung von p nach q (Fig. 1) verläuft, so wird dieser Faden offenbar nur Ablenkungen rechtwinkelig zu seiner Achse, also stets in solchen Ebenen bewirken, welche zur Kante h parallel sind. Bei der Anordnung Fig. 1 wird in diesem Falle, selbst für den Augenblick der empfindlichen Einstellung, die Schliere nicht sichtbar werden.

Um also aller Schlieren ansichtig zu werden, welche in der Linse selbst, oder auch in den dicht vor oder hinter der Linse befindlichen durchsichtigen Medien aufgesucht werden sollen, bleibt nichts Anderes übrig, als das Diaphragma um den Punkt b herum, in einer zur optischen Axe ab senkrechten Ebne zu drehen, und dasselbe in verschiedenen Lagen bis zur empfindlichen Einstellung vorzuschieben. Im Allgemeinen genügt es schon zur Erkennung aller Schlieren, die Kante h in nur zwei zu einander rechtwinkeligen Lagen einzustellen. Bei sehr subtilen Untersuchungs-Objecten ist jedoch eine Einstellung des Diaphragmas in beliebig veränderter Lage wünschenswerth.

Es mag schon jetzt am Platze sein, auf die grosse Empfindlichkeit aufmerksam zu machen, welche unter sonst günstigen Verhältnissen die Methode verspricht. Eine nochmalige Betrachtung der Fig. 1 lässt dies sofort erkennen.

Wenn irreguläre Strahlen, wie gf , selbst in unmessbarer Entfernung unterhalb b vorbeistreichen, so ist dennoch eine Stellung von hc möglich, bei welcher b abgeblendet, die irregulären Strahlen also für das Auge isolirt sind. Es bedarf nur eines geeigneten Mechanismus, die Diaphragmenkante h in sehr kleinen Grenzen vor- und rückwärts zu bewegen und fein einstellen zu können. Ferner lässt sich sofort übersehen, dass *cet. par.* die Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit des Apparates in gradem Verhältniss mit dem Abstand Lb steht, da die Abweichung der irregulären Strahlen von b mit steigender Distanz zunimmt.

Wollte man nun in der bis jetzt vorausgesetzten einfachen Weise einen Versuch anstellen, so würde derselbe nur mangelhafte Resultate geben, ja in den meisten Fällen ganz unausführbar sein. In der Wirklichkeit treffen die bisher gemachten Voraussetzungen nicht zu, und es ist zur bequemen und sicheren Ausführung wissenschaftlicher Untersuchungen eine Complication des Apparates unerlässlich. Nichtsdestoweniger habe ich mich überzeugt, dass mehrere der später zu beschreibenden Versuche schon mit einem guten, grösseren Fernrohr-Objectiv, einem in der Hand gehaltenen Diaphragma und dem blossen Auge gelingen. Sehen wir vorläufig ganz davon ab, dass in Wirklichkeit die Lichtquelle a und somit auch das Bild b räumliche Ausdehnung besitzen, dass ferner die grosse Linse L behufs Aufhebung der chromatischen und sphärischen Abweichung durch ein System von Linsen zu ersetzen ist, so bietet sich eine der Hauptschwierigkeiten durch die Stellung des Auges. Vom Punkte b (Fig. 1) aus divergiren die Lichtstrahlen nach dem Auge hin. Während der Aufsuchung der empfindlichen Stellung, die bei jeder Beobachtung wiederkehrt, wechselt das Gesichtsfeld zwischen blendendem »Hell« und »Dunkel«; daher verengert sich die Pupille meistens so sehr, dass sie bei der kleinsten Bewegung des Kopfes oder Auges die eindringenden Strahlen zum Theil abblendet, so dass man zuletzt gar nicht weiss, ob die beobachtete Veränderung in der Beleuchtung des Sehfeldes von der Stellung des Diaphragmas hc oder den Pupillenrändern herrührt.

Um diesem einigermassen zu begegnen, muss das Auge so sehr an b genähert werden, dass b ganz nahe vor der cornea transp. liegt, damit das Strahlenbündel noch in der Pupille möglichst schmal sei. Dass aber bei einer solchen Stellung die Handhabung des Diaphrag-

mas fast unmöglich ist, ist ebenso klar, als wie, dass das nunmehr zu Thränen gereizte Auge zur Erkennung feinerer Objecte ganz unfähig wird.

Ich kam daher auf den Einfall, das Auge soweit zu nähern, dass b innerhalb und zwar grade in die Pupillenöffnung zu liegen kommt, um die Ränder der Pupille selbst als Diaphragma benutzen zu können. Eine solche Verlegung des Punktes b hat von theoretischer Seite durchaus nichts gegen sich. Allein es ist zunächst äusserst schwierig, durch blosse Bewegung des Kopfes diejenige Stellung ausfindig zu machen, bei welcher b grade auf den Pupillenrand fällt, noch schwieriger aber ist es in diesem Falle, die einmal erlangte empfindliche Stellung zu fixiren, da wie erwähnt, die Pupille in fortwährenden Veränderungen sich befindet, welche nicht unter der Botmässigkeit unseres Willens stehen. Ausserdem ist der Pupillenrand weder von scharf begränzter Kreisform, noch auch scheint die Iris an jenem Rande hinreichend undurchsichtig zu sein. Endlich hat die directe Beobachtung mit dem Auge, wie sie in Fig. 1 angenommen, noch den wesentlichen Nachtheil, dass bei der grossen Entfernung von O bis L , die mindestens 10 bis 15 Fuss betragen muss, die Linse oder das vor derselben untersuchte Object zu klein erscheinen, um zartere Details erkennen zu können.

Allen diesen Missständen lässt sich durch ein passend eingeschaltetes Fernrohr begegnen. Die Anordnung, welche ich bei allen später zu erwähnenden Versuchen mit überraschendem Erfolg benutzte, ist durch das Schema Fig. 3 erläutert.

Auch hier bedeutet a die Beleuchtungsquelle, in den meisten Fällen eine sehr kleine, kreisrunde Oeffnung in einer dünnen, geschwärtzten Metallscheibe. Dicht hinter dieser Oeffnung befindet sich eine sehr hell brennende Flamme, wie sie etwa durch eine Argand'sche Oellampe der besten Construction geliefert wird. Die Wirkung ist hierbei offenbar dieselbe, als ob die nach L hin divergirenden Strahlen in a selbst erzeugt würden. L ist ein Linsensystem von mindestens $2\frac{1}{2}$ —4 Fuss Brennweite und möglichst grosser Oeffnung, welches in der Entfernung von 10—25 Fuss von a ein möglichst deutliches Bild entwirft. In dieser Entfernung ist ein kleines, astronomisches Fernrohr F in die optische Achse des Linsensystems eingestellt. (Auch in Fig. 3 ist auf das Verhältniss der Dimensionen keine Rücksicht genommen.) Das Fernrohr ist so gestellt:

1. dass das deutliche Bild von a auf die Vorderfläche der Objectivlinse b oder doch ganz dicht davor fällt, und

2. ist das Fernrohr selbst soweit ausgezogen, dass es für die Entfernung des Linsensystems LL' adjustirt ist, so dass also das Auge O ein deutliches, vergrössertes, umgekehrtes Bild mn der vorderen Linse L' erblickt. Die Entfernung des Auges von der Ocularlinse s , die sogenannte Augenweite des Fernrohrs, ist möglichst genau so zu justiren, dass beim bequemen Anlegen des Auges an die Metallfassung des Oculars das optische Bild, welches die Linse s vom Objective b entwirft, mit der Pupillenöffnung zusammenfällt. Es ist bei dieser Anordnung klar, dass die von L nach b convergenten Strahlen, bevor sie im Auge das Gesichtsfeld mn gleichmässig beleuchten, im Auge selbst, und zwar in der Pupille noch einen Knotenpunkt p haben. Wird nun ganz dicht vor dem Objective b der undurchsichtige Schirm hc vorgeschoben, so wird plötzlich das ganze reguläre Strahlenbündel abgeblendet, es ergibt sich, wie früher eine sogenannte empfindliche Einstellung. Was bei b vorgeht, wiederholt sich aber genau bei p , so dass bei dieser Anordnung der Erfolg ganz so sein wird, als ob man im Auge selbst bei p ein verschiebbares Diaphragma aufgestellt hätte.

Gleichzeitig hat man den wesentlichen Vortheil, die in den Linsen LL' oder in ihrer Nähe aufgesuchten Schlieren beliebig vergrössert zu sehen, so dass selbst feine Untersuchungsobjecte genau betrachtet werden können in Entfernungen, wie sie von der Methode verlangt werden, falls sie empfindlich sein soll. Ausserdem hat die Anwendung des Fernrohres für wissenschaftliche Arbeiten den unberechenbaren Vortheil, dass man genaue Messungen mit der Beobachtung verbinden kann, falls man sich eines Ocularmicrometers mit Fadenkreuz bedient.

Specielle Beschreibung des Apparates.

§ 2. Es ergibt sich aus unseren einleitenden Erörterungen, dass von der Construction des ganzen Apparates, den wir ein für allemal »Schlieren-Apparat« nennen wollen, namentlich aber von der richtigen Einstellung sehr Vieles abhängt.

Ich habe durch fortgesetzte Versuchsreihen die Grundbedingungen für die vortheilhafteste Construction zu erforschen gesucht. Ganz allgemein gültige Verhältnisse für die Dimensionen etc. lassen sich nicht aufstellen. Im Gegentheil ändert sich die Anordnung sehr häufig je nach dem Untersuchungsobject.

I. Die Lichtquelle *a* Fig. 2 wird, wie schon erwähnt, in sehr vielen Fällen durch eine sehr feine, kreisrunde Oeffnung mit dahinter gestellter, hellbrennender Lichtflamme repräsentirt. — In der Folge soll dieser erste Theil des Apparates kurz »Illuminator« genannt werden. — Auf einem Statif *a*, Fig. 4, das zum Höher- und Tieferstellen eingerichtet ist, befindet sich eine um die Achse *b* leicht drehbare, dünne Metallscheibe *A* von mehren Zoll Durchmesser. In dieser Scheibe sind in der Nähe des Randes und in gleichem Abstände von der Achse kreisrunde Oeffnungen mit verschiedenem Durchmesser (von $\frac{1}{6}$ bis 1 *mmtr.*) eingebohrt. Eine von diesen Oeffnungen hat zu besonderen Zwecken etwa $\frac{1}{2}$ Zoll Weite. Die feinen Oeffnungen müssen scharf geschnitten sein. Ich habe denselben daher stets die in Fig. 6 im Durchschnitt vergrößert gezeichnete Gestalt gegeben. Mit einem eigens geschliffenen stumpfwinkligen Bohrer wird die Platte von beiden Seiten so angebohrt, dass in der Mitte die scharfe Kante *mn* entsteht. Eine Klemmschraube *c* Fig. 4 macht es möglich, die drehbare Scheibe *A* in jeder Lage festzustellen. Das ganze Statif ist auf einem Schlitten befestigt, welcher durch eine Bolzenschraube *d* in dem Schlitz *ef* eines $3\frac{1}{2}$ — $4\frac{1}{2}$ Fuss langen Brettes festgestellt werden kann. Dicht hinter die drehbare Scheibe *A* stellt man eine sehr gute Argand'sche Lampe auf. Mit gutem Erfolg habe ich mich zur gleichmässigen intensiven Erleuchtung einer Vorrichtung bedient, wie sie beim Polarisations-Sacharometer schon lange in Gebrauch ist. Ueber den Glasschornstein ist ein Metallcylinder *g* gestürzt, welcher innen eine blendend weisse Bekleidung von Gyps oder feiner Thonmasse trägt. Gegenüber demjenigen Flammentheil, welcher die intensivste Lichtentwicklung zeigt, ist an den Cylinder *g* ein inwendig geschwärztes Seitenrohr *h* von $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{4}$ Zoll Weite angesetzt, und dicht vor die Oeffnung dieses Rohres placirt man nun eine von den Löchern der Scheibe *A*. Diese Löcher müssen weit genug vom Scheibenrande abstehen, um die ganze Mündung von *h* durch den Scheibenrand bedecken zu können. Für das Gelingen der Versuche ist es nämlich sehr vortheilhaft, alles überflüssige Licht sorgfältig abzublenden.

Ich habe der hier beschriebenen Anordnung des Illuminators vor allen Combinationen mit Linsen und Hohlspiegeln den Vorzug geben müssen. Zu besonderen Versuchen, welche momentane Beleuchtung erfordern, habe ich mich des electricischen Funkens als Lichtquelle bedient. Die Anordnung des electricischen Illuminators ist später noch besonders zu erläutern. Dem Linsensystem *DC* Fig. 4 kann man verschiedene Einrichtung geben. Zu allen Versuchen eignet sich am besten der Kopf einer grösseren photographischen *Camera obscura*

von 2 bis $2\frac{1}{2}$ Fuss Brennweite. Eine Schraube l erlaubt ein feines Verschieben des Kopfes C in seiner Längsrichtung. Die Hülse ik , in welcher sich der Kopf verschiebt, ruht lose auf einem gabelförmigen Gestell m , so dass man Hülse sammt Kopf um die eigene Achse drehen kann, was, wie wir sehen werden, zur Prüfung des Apparates nöthig ist. Das Gestell m kann vermittels eines Schlitzes und einer Bolzenschraube n seitlich verschoben und festgeklummt werden, und zwar auf demselben Fussbrett op , auf welchem der Illuminator sich befindet.

Der dritte Theil des Apparates, der Analysator, wie wir ihn kurz nennen wollen, bestehend aus Fernrohr und beweglichem Diaphragma, wird am zweckmässigsten hergestellt, wie in Fig. 5 dargestellt ist. Ein mit Stellschrauben versehenes, transportables Statif q trägt einerseits eine federnde Hülse r , in welcher ein kleines Fernrohr s nicht allein sehr leicht horizontal hin und her geschoben, sondern auch um seine eigne Achse gedreht werden kann. Ich habe Fernrohre je nach Bedürfniss von 4 bis 12 maliger Vergrößerung gebraucht und muss schon hier bemerken, dass es vorzuziehen ist, das Ocular nur aus einer einzigen Linse herzustellen. Ein zweiter Arm u des Ständers trägt eine leicht drehbare, in der Mitte durchbrochene Scheibe v . Die centrale Oeffnung dieser Scheibe liegt grade in der Fernrohrachse.

Auf der dem Fernrohr zugewendeten Seite bewegt sich zwischen Coulissen der Schlitten x , der durch die feine Micrometerschraube w hin und her gezogen werden kann. Das Fernrohr-Objectiv ist bis dicht an den Schlitten, welcher auch durchbrochen ist, heranzuschieben. Fig. 7 und 8 zeigen die Diaphragmen-Vorrichtung in Durchschnitt und Vorderansicht in etwa $\frac{3}{4}$ natürlicher Grösse. Man sieht in Fig. 7 den ebenfalls durchbrochenen Schlitten xy . Auf diesen Schlitten kann ein dünnes, scharfrandiges Diaphragma abc , ebenfalls durchbrochen, (zwischen b und c) aufgelegt und durch die Federn z (in der Fig. ist nur eine sichtbar) festgehalten werden. Zu gewöhnlichen Versuchen benutze ich ein Diaphragma mit halbkreisförmigem Ausschnitt (Fig. 9.). Die scharfe Kante mn der Fig. 8 und 9 erscheint in Fig. 7 im Punkte b verkürzt. Das Diaphragma ist von dünnem Metallblech oder hartem geschwärztem Papier scharf. ausgeschnitten, und kann gelegentlich durch anders gestaltete Diaphragmen ersetzt werden. Die Federn z liegen seitlich, hindern somit die dichte Annäherung des Fernrohr-Objectives nicht. Die halbkreisförmige Oeffnung des Diaphragmas ist so gross, dass sie etwa das halbe Objectiv des Fernrohres freilässt. Man kann durch Drehung der Scheibe v und

gleichzeitige Benutzung der Klemmschraube p das Diaphragma in beliebiger Lage feststellen und bis zur empfindlichen Einstellung vorschoben. Der Analysator des Schlierenapparates ist, wie schon früher erwähnt, 15—25 Fuss von dem Kopfe DC entfernt, axial aufgestellt. Es erzeugt sich daher von der Oeffnung des Illuminators bei richtiger Stellung ein vergrössertes Bild o (Fig. 8) auf dem Diaphragma. Weil o ein Kreis und kein Punkt ist, so ändert sich der Begriff der »empfindlichen Einstellung« gegen das früher Bemerkte in etwa. Wird die Kante mn (Fig. 8) langsam abwärts geschoben, so fällt von dem Kreise o ein immer kleineres Segment auf das dahinter befindliche Objectiv. Zuletzt ist dies Segment bis auf eine zarte Lichtlinie zusammengeschwunden. Bis dahin hat das in's Fernrohr schauende Auge eine langsame Abnahme der Helligkeit gleichmässig über das ganze Gesichtsfeld wahrgenommen. Bei der leisesten weiteren Bewegung von mn wird auch die letzte Lichtlinie abgeblendet; dann bemerkt das Auge einen sehr raschen Uebergang zu völliger Dunkelheit. Dies ist die empfindliche Stellung. Die letzte zarte Lichtlinie kann ohne erheblichen Fehler als eine Reihe mathematischer Punkte angesehen werden. Die sämmtlichen durch eine Schliere bei C (Fig. 4) veranlassten irregulären Strahlen gelangen für alle jene Punkte in gleichem Sinne an der Kante mn vorbei in's Fernrohr, und vereinigen sich später zu einem einzigen deutlichen Bilde der Schliere auf der Netzhaut, weil das Fernrohr grade für die Entfernung des Kopfes accommodirt ist. Der Umstand also, dass man es in der Praxis nicht mit leuchtenden Punkten im mathematischen Sinne zu thun hat, thut der Empfindlichkeit der Methode gar keinen Abbruch. Die Empfindlichkeit ist nur aus dem einzigen Grunde keine unbegrenzte, weil es in der That kein Linsensystem gibt, welches ein absolut scharf begrenztes Bild o entwirft.

Für die meisten Beobachtungen ist es zu empfehlen, noch einen ganz schmalen Rest des Bildes o auf das Fernrohr fallen zu lassen. Man erblickt alsdann in den Schlieren Abstufungen zwischen hell und dunkel, wie sich dies leicht erklären lässt. Auf diese Weise tritt das Bild deutlicher hervor und lässt viel leichter die wahre Gestalt der Schlieren beurtheilen.

Es mögen hier noch einige Bemerkungen über die Construction des Linsensystems DC (Fig. 4) und die Einflüsse der chromatischen sowohl, als der sphärischen Abweichung am Platze sein.

Am besten eignen sich, wie bereits erwähnt, zu allen Versuchen die grösseren Köpfe von photographischen Cameras, weil diese grade für die hier gewünschten Entfernungen berechnet sind. Fehler in Be-

zug auf den Achromatismus und die sphärische Abweichung lassen sich glücklicherweise durch den Schlierenapparat selbst sofort erkennen.

In der That, schaltet man an Stelle des Kopfes eines der gewöhnlichen, grösseren achromatischen Fernrohr-Objective in den Schlieren-Apparat, so macht sich die sphärische Abweichung geltend, sobald der Analysator nicht sehr weit entfernt wird. Selbstredend ist es, dass man die Flintglasseite dem Illuminator zuzukehren hat. Man erblickt bei kleinem Abstände des Analysators das Gesichtsfeld nicht gleichmässig erhellt, sondern man sieht das Bild A (Fig. 1, Tafel II), welches ganz den Eindruck macht, als ob auf die Mitte der Linse eine stärker gekrümmte, linsenförmige Erhabenheit aufgesetzt wäre. Die Erscheinung erklärt sich leicht.

Es sei c der Focus der Central-, a der Focus der Randstrahlen, db die Stellung des Diaphragmas, so ist dieses offenbar nur für die in b vereinigten Mittelstrahlen empfindlich eingestellt, Strahlen, die von einem Kreise mit dem Durchmesser mn herrühren. Die übrigen Strahlen geben nach früheren Erörterungen ein nur halb beleuchtetes Gesichtsfeld, und zwar in entgegengesetztem Sinne, je nachdem die Strahlen innerhalb oder ausserhalb von mn liegen. Nur für sehr grosse Distanzen lässt sich ein einziges Fernrohr-Objectiv daher als Kopf benutzen. Ganz gut aber eignet sich die Combination zweier solcher Objective mit grosser Brennweite. Der achromatische Kopf ist, wie man erkennt, der kostspieligste Theil des Schlieren-Apparates, namentlich wenn man ein einigermassen grosses Sehfeld haben will. Ich habe mich nun überzeugt, dass sehr viele der später zu schildern den Versuche auch mit nicht achromatischem, sonst fehlerlosen Kopf gelingen. In der That ist die chromatische Abweichung nicht so störend, als die sphärische. Nicht achromatische Köpfe erkennt man sofort im Schlieren-Apparate daran, dass bei der empfindlichen Einstellung das Gesichtsfeld aus zwei verschieden gefärbten Hälften besteht. Es bezeichne L (Fig. 2, Tafel II) einen nicht achromatischen Kopf, a die Vereinigung der violetten, c der rothen, b der mittleren Spectral-Strahlen, so werden bei der empfindlichen Stellung die letzteren grade abgeblendet sein. Wie man erkennt, bleiben auf entgegengesetzten Seiten noch halbe Strahlenbündel von beiden Enden des Spectrums übrig. r erscheint in der That blutroth, v blauviolett. Man sieht alsdann etwaige Schlieren nicht hell auf dunkel, sondern meist in den prächtigsten Farben spielend. Auch überzeugt man sich durch den Schlieren-Apparat leicht, dass wie bekannt, gar keine wirklich achromatischen Linsen aus nur 2 Glassorten existiren. Bei den

Besten fand sich doch noch immer eine Hälfte grüngelb, die andere schwach himmelblau gefärbt.

Ich kann in der That zu vielen Versuchen Köpfe aus zwei einfachen Plan-Convexlinsen empfehlen, welche ihre plane Seite dem Illuminator zuwenden. Die dem Illuminator nächstgelegene hat passend eine etwas kleinere Brennweite. Sind p' und p'' die beiden einzelnen Brennweiten, so findet man die Focallänge der ganzen Combination bekanntlich nach der Näherungsformel

$$P = \frac{p' p''}{p' + p''},$$

weil bei den hier in Rede stehenden Verhältnissen die Glasdicke ausser Acht zu lassen ist.

Hat man über eine sehr intensive Lichtquelle zu verfügen, so kann man auch die Fehler der chromatischen Abweichung durch Anwendung einfachen Lichtes vermeiden. Zu dem Ende stellt man dicht vor oder hinter die Scheibe *A* (Fig. 4, Tafel I) eine stark roth gefärbte plane Glasplatte auf. Die Platte muss jedoch ganz schlierenfrei und sorgfältig plan geschliffen sein. Leider wird bei gewöhnlichem Lampenlicht durch diese Anordnung die Beleuchtungsintensität so geschwächt, dass feinere Objecte nicht immer deutlich zu erkennen sind.

Es ist schliesslich noch die Frage zu erledigen, wo am Besten das zu untersuchende Object aufgestellt wird, ob dicht vor oder hinter dem Kopf. Die Aufstellung an der, dem Analysator zugekehrten Seite ist im Allgemeinen vorzuziehen. Wenn aber das Untersuchungs-Object ein stark selbstleuchtender Körper ist, (Flamme u. s. w.) so entstehen auf den Linsenflächen Spiegel-Bilder, die ebenfalls im Analysator gesehen werden. Bei subtilen Objecten sind dieselben sehr störend. Daher placirt man die Objecte in letzterem Falle vor die Oeffnung *D* (Fig. 4, Tafel I), natürlich möglichst nahe an den Kopf.

Bemerkungen über die Adjustirung und den Gebrauch des Schlieren-Apparates.

§ 3. Von der Einstellung der drei Haupttheile in ein und dieselbe optische Achse hängt natürlich die Genauigkeit einer jeden Beobachtung ab. Bei der grossen Entfernung von Kopf und Analysator scheint diese Einstellung durch blosses Probiren und planloses Hin- und Herschieben sehr zeitraubend, wenn nicht dabei ein ganz systematisches Verfahren inne gehalten wird.

Für denjenigen Leser, welcher sich des Schlieren-Apparates bedienen will, beschreibe ich in Folgendem ein Verfahren, welches in höchstens 8 bis 10 Minuten zum Ziele führt, selbst wenn man keinen Gehülfen zur Hand hat. Man erzielt dadurch allerdings keine ganz genaue Einstellung, es genügt dieselbe aber zu den meisten Zwecken, und kann in besonderen Fällen leicht corrigirt werden.

Indem wir noch einmal Fig. 4, 5, 7 und 8 (Tafel I) zu Grunde legen, haben wir folgende Reihe von Operationen auszuführen:

1. das Brett *op* mit Illuminator und Kopf (Fig. 4) wird möglichst horizontal auf einen Tisch aufgestellt. Man entfernt *A* um etwa 6 Zoll ausserhalb der Brennweite des Kopfes *CD*. Die Lampe *B* ist vorläufig ganz bei Seite zu lassen. Die Oeffnung *C* des Kopfes wird mit einem geschwärzten Deckel geschlossen und die Scheibe *A* so hoch gestellt, dass ihr Mittelpunkt ungefähr im Niveau mit der Achse des Kopfes liegt. Die Scheibe *A* wird so gedreht, dass die grösste der Oeffnungen (diejenige von circa $\frac{1}{2}$ Zoll Durchmesser) frei liegt. Nun nähert man an Stelle der Lampe ein Auge bis auf etwa 8 bis 10 Zoll, und bringt eine kleine Lichtflamme etwa in die Mitte zwischen *A* und *C*. Das Auge erblickt durch die Oeffnung von *A* sofort eine Reihe von theils aufrechten, theils umgekehrten Spiegelbildern der Flamme. Durch versuchsweises Drehen des Kopfes in horizontaler Richtung um n , der Scheibe *A* in vertikaler Ebene und Bewegung der Flamme findet man bald eine Stellung, in welcher die Flamme mit sämmtlichen optischen Bildern ungefähr auf der Mitte des Kopfes zusammenfällt. Ohne weitere Erläuterung ist dies ein Beweis, dass der Illuminator mit hinreichender Genauigkeit in der optischen Achse des Kopfes liegt. Man zieht die Schrauben *d* und *n* vorläufig fest an.

2. Ebenso leicht ist der Analysator einzustellen. Man stellt denselben je nach Bedürfniss 15 bis 25 Fuss weit auf einen zweiten Tisch (oder passendes Statif), ungefähr in gleiche Höhe mit der Achse des Kopfes. Der Analysator muss recht fest und sicher stehen und wird durch die Fusschrauben so gestellt, dass die Fernrohrachse möglichst horizontal liegt. Nun zieht man das Diaphragma *x* durch die Schraube *w* soweit auf, dass man bequem durch's Fernrohr sehen kann. Mittels der Stellvorrichtung *q* kann man nun leicht den Apparat so weit heben resp. senken, dass der entfernte Kopf möglichst mitten im Gesichtsfelde des Oculars sichtbar wird. Kopf und Analysator sind hinreichend genau au niveau gebracht.

3. Man begibt sich nun wieder zum Fussbrett *op* und dreht dasselbe, indem man über *A* und den Kopf oberflächlich visirt, bis

die ganze Vorrichtung ziemlich genau nach dem Analysator hinzielt. Befreit man nun den Kopf DC von seinem Deckel, so wird man, noch einmal durch die unter Nr. 1 festgestellte weite Oeffnung bei A schauend, ein umgekehrtes, verkleinertes Bild des Analysators erblicken. Löst man nun d , so kann man die Vorrichtung A leicht soweit verschieben, dass jenes Bild grade in die weite Oeffnung von A fällt, was man daran erkennt, dass bei der seitlichen Hin- und Herbewegung des Auges Bild und Oeffnung ihre gegenseitige Lage nicht verändern. Hat man dies erreicht, so weiss man, dass auch das optische Bild der Oeffnung in A grade auf den Analysator fallen muss.

4. Jetzt erst verdunkelt man das Beobachtungslokal, und zwar möglichst vollständig durch Verschliessung der Läden. Alsdann ist die Lampe B hinter A aufzustellen, und zwar grade so hoch, dass die Mündung des Rohres h dicht hinter der Scheibenöffnung, möglichst centrisch mit derselben steht. Man erblickt sofort ein stark vergrössertes Bild der Illuminator-Oeffnung auf der Analysatorscheibe v . Es ist nun sehr leicht, dem Analysator eine letzte feine Einstellung so zu geben, dass jenes optische Bild sich central auf der Scheibe v projizirt. Die Deutlichkeit des Bildes lässt sich durch die Kopfschraube l leicht corrigiren. Zu diesem Zwecke ist es rathsam, die Vorderseite sowohl der Scheibe v , als des Diaphragmas weiss oder möglichst hell zu färben. Ist der Apparat so weit hergerichtet, so genügt eine Drehung der Illuminatorscheibe A , um sofort die zur Schlierenbeobachtung bestimmten kleinen Oeffnungen der Reihe nach deutlich auf dem Fernrohrobjectiv erscheinen zu sehen. Jetzt erst kann zur eigentlichen Ausführung der Beobachtung geschritten werden. Ein durch t Fig. 5 blickendes Auge sieht zunächst bei obiger Stellung ein blendend helles Bild der Kopflinsen, welches durch Vorrücken des Diaphragmas in der schon oben besprochenen Weise zuerst langsam, dann plötzlich sich verdunkelt. Hat man nun das Fernrohr gut eingestellt, so dass das Bild des Kopfes recht scharf erscheint, so macht man meistens die Beobachtung, dass alle feinen Staubtheilchen auf den Kopflinsen, meistens auch der Linsenrand in eigenthümlichem Lichte strahlen, was sich ganz einfach als Beugungserscheinung erklärt. Die Kopflinsen sind daher möglichst sauber zu halten. Es wird nun meistens der Fall sein, dass man sofort im Apparate selbst Schlieren erblickt, welche entweder dem Kopf, oder dem Analysator zur Last gelegt werden müssen. Man hat, um dies ausfindig zu machen, nur die betreffenden Theile einzeln um ihre Achse zu drehen, und wird bald erfahren, welchem Theile die Schlieren bei der Drehung folgen. Etwaige Schlieren im Kopf, wo sie fast nie ganz fehlen, ma-

chen denselben durchaus nicht untauglich, wenn dieselben nur nicht zu hervortretend sind. Wenn man sich einmal ihre Gestalt und Lage gemerkt hat, so wird man sie bei späteren Beobachtungen leicht wieder erkennen und sich nicht täuschen lassen. Im Analysator kann nur das Ocular zu Täuschungen Veranlassung geben. Auch hier werden sich grössere Risse, Staubtheilchen etc. unter Umständen mit auf dem Gesichtsfelde projiziren, daher man sehr auf die Beschaffung einer klaren, spiegelblanken Ocularlinse zu achten hat. — Staubtheilchen oder feine Risse auf dem Analysator-Objectiv haben, wie die Theorie des Apparates von selbst ergibt, gar keinen störenden Einfluss (von Intensitäts-Verminderung abgesehen). Man kann mit ganz bestaubtem Objectiv correcte Beobachtungen anstellen. Zuweilen, namentlich bei den kleinsten Illuminatoröffnungen, zeigen sich auch die bekannten entoptischen Phänomene, Flüssigkeitstropfen auf der Vorderfläche der cornea transp. etc. im Gesichtsfelde, jedoch immer so matt, dass sie wohl selten bei Versuchen stören. Durch die letztbesprochenen Controlversuche hat man ein für allemal seinen Apparat kennen gelernt. Man schreitet nun zur Beobachtung. Placirt man beispielsweise eine Kerzenflamme dicht vor die dem Illuminator zugewandte Oeffnung des Kopfes, so erblickt man die Erscheinung des Flammenmantels (siehe unten). Im Allgemeinen präsentiren sich die Schlieren-Phänomene als scharf schattirte, wohl begränzte Zeichnungen, welche oft durch ihre Zierlichkeit den Eindruck machen, als seien sie aus Glas gearbeitet. Bei jedem eingestellten Object ist das Fernrohr für dasselbe möglichst genau zu adjustiren. Es braucht kaum erwähnt zu werden, dass alle subtileren Beobachtungen nur im Dunkeln vorzunehmen sind.

Schlieren in Gläsern.

§ 4. Bevor ich dazu übergehe, einige wissenschaftlich vielleicht interessante Versuche mitzutheilen, muss ich mit wenigen Worten noch einmal der Schlieren im engeren Sinne, wie sie in zu optischen Zwecken benutzten Glasmassen vorkommen, gedenken. Sie bildeten ja den Ausgangspunkt für meine späteren Versuche.

Man überzeugt sich leicht vermittels des Schlieren-Apparates, dass ganz schlierenfreie Gläser zu den äussersten Seltenheiten gehören. Wenn man die dicken Spiegelscheiben, aus welchen die ordinären Gläser zu Brillen etc. verschliffen werden, langsam zwischen Kopf und

Illuminator hin- und herschiebt, während die Einstellung des Diaphragmas fortwährend variiert wird, so sucht man meistens vergebens auch nur nach einem einzigen Quadratzoll vollkommen homogener Glasmasse. Es lassen sich die Schlieren, wenn man so will, in zwei Classen eintheilen. Die einen sind sehr deutlich sichtbare, meistens isolirte, band- oder fadenrörmige Gebilde von sehr verschiedener Gestalt und Grösse. Eine zweite Art ist mehr durch die ganze Glasmasse vertheilt und gibt derselben im Schlieren-Apparate das Ansehen, als ob die ganze Fläche mit sehr zarten Pinselstrichen überzogen wäre. Letztere Schlieren lassen sich viel schwerer, als erstere erkennen. Ich untersuchte eine Fernrohr-Objectivlinse (von 5 Fuss Brennweite und 3 Zoll Oeffnung), welche sich erst nach dem Schliff als untauglich erwies. Sie gab zwar, mit einem Ocular combinirt, bis zu 25facher Vergrößerung noch ziemlich deutliche Bilder. Bei stärkeren Vergrößerungen waren jedoch die Bilder der Fixsterne keine Punkte, sondern kleine Lichtlinien. Ich schaltete die Linse in den Kopf des Schlieren-Apparates, und suchte anfänglich vergebens nach Schlieren. Bei sehr feiner Einstellung fand ich endlich die ganze Linse von jenen äusserst zarten, in diesem Falle parallelen und fast gradlinigen Pinselstrichen durchzogen. Diese Schlierenart ist die böseartigste. Die erstere Art, wenn sie allein vorkommt, ist nicht so bedenklich. Ich habe oft in anerkannt guten Fernrohr-Objectiven solche isolirte Schlieren, manchmal aus 1, 2, ja 3 meistens parallelen Streifen das Feld der Linse durchziehen sehen. Wenn die sonstige Grundmasse homogen, so wirken dieselben in der That fast nicht schädlicher, als ob die betreffende Stelle des Objectives gar nicht vorhanden wäre.

Ich glaube, dass in den Fabriken optischer Gläser der Schlieren-Apparat sehr wesentliche Dienste zu leisten im Stande ist. Leider habe ich selbst nicht Gelegenheit gehabt, die soliden, grösseren Glasmassen zu untersuchen, welche durch eine Schmelze in den Glashäfen erzeugt werden. Aus der Gestalt und Lagerung der Schlieren liessen sich vielleicht sehr interessante Schlüsse in Bezug auf ihre Bildung ziehen, Schlüsse, aus denen zukünftige Verbesserungen im Schmelzverfahren zu erwarten wären.

Beobachtungen mittels des Schlieren-Apparates.

In den folgenden Abschnitten will ich einige physicalische Versuche mittheilen, welche sich mit Hülfe der oben erläuterten Methode leicht anstellen lassen. Ich muss den Leser darauf aufmerksam machen, dass ich weit entfernt bin, diesen abgerissenen Mittheilungen wissenschaftlichen Werth beizulegen. Die von mir benutzten Apparate waren zu exakten Messungen nicht ausreichend, weshalb ich Manches nicht mit erschöpfender Gründlichkeit verfolgen konnte.

Nur für die Beobachtungen über den »electrischen Funken« darf ich den Namen einer abgeschlossenen Versuchsreihe in Anspruch nehmen. Der Grund, weshalb ich schon jetzt meine Beobachtungen an die Oeffentlichkeit bringe, ist in dem Wunsche zu suchen, die vielseitige Anwendbarkeit meiner Methode zu beweisen. Auch möchte ich späteren Experimentatoren auf diesem Felde das bereits Begonnene zu weiterer Ausführung unterbreiten.

Sämmtlichen Versuchen dienten die folgenden Linsensysteme als Kopf des Schlieren-Apparates:

Nr. 1. Ein System von 2 unachromatischen Planconvex-Linsen mit circa $4\frac{1}{2}$ Zoll Oeffnung. Diese waren unter etwa 15 Linsen ausgesucht und als die Besten erkannt worden. Die eine zeigte noch eine bandförmige Schliere fast mitten im Felde, die zweite eine wellige Ungleichförmigkeit in der Nähe des Randes. Beides nur bei sehr empfindlicher Einstellung sichtbar.

Nr. 2. Ein sehr guter, achromatischer Kopf aus einer Camera obscura; derselbe war fast ganz schlierenfrei, hatte aber leider nur $2\frac{3}{4}$ Zoll Oeffnung. Die chromatische Correction war ziemlich vollkommen.

Nr. 3. Ein 28 Linien weites, sehr gutes Fernrohr-Objectiv. Dasselbe war schlierenfrei, konnte aber wegen der früher besprochenen, sphärischen Abweichung nur bei kleinen Objecten benutzt werden.

Veränderung durchsichtiger Körper durch Temperatur und Druck.

§ 4. Es lag mir zunächst der Wunsch nahe, die Empfindlichkeit meiner Methode durch directe Versuche auszumitteln. Nichts schien mir hierzu tauglicher, als theilweise Veränderung des Brechungsvermögens durch ungleichförmige Erwärmung. Bringt man einen nur mässig erwärmten Körper vor oder hinter den Kopf, so sieht man sofort die umgebenden Luftschichten auf's lebhafteste disturbirt. Ja bei sehr empfindlicher Einstellung genügt es, das Statif oder den unteren Theil des Kopfes einige Zeit mit warmer Hand zu berühren, um bald darauf bandartige Schlieren im Gesichtsfelde aufsteigen und flammenartig hin- und herziehen zu sehen.

Diese Schlierenbildung in der Luft durch Erwärmung schien mir das geeigneteste Mittel, die Genauigkeit der Methode zu controliren. Das specielle Verfahren war sehr einfach.

Es bedeute in Fig. 3 (Tafel II) der schattirte Kreis *A* das Gesichtsfeld des Kopfes. Der Analysator wurde empfindlich eingestellt. Es zeigt der Pfeil die Richtung an, in welcher das Diaphragma in dem Analysator vorgeschoben wurde, natürlich unter Berücksichtigung der durch's Fernrohr bewirkten Umkehrung. In den von jetzt ab folgenden Figuren hat der Pfeil stets dieselbe Bedeutung.

Vor das Gesichtsfeld brachte ich eine kleine, flache Platin-Schale *a*, auf einem Statif ruhend. Das Schälchen war äusserst dünnwandig und etwa $2\frac{1}{2}$ Zoll im Durchmesser. Es wurde bis zum Rande mit Quecksilber gefüllt. Von der Seite her tauchte ein sehr empfindliches Thermometer *b* mit seiner Kugel in das Quecksilber, und war an einem zweiten Statif so befestigt, dass man die Temperatur des Quecksilbers, ohne dem Apparat zu nahe zu kommen, auf einige Entfernung hin ablesen konnte. In der Nähe war zum Vergleich ein zweites Thermometer *c* zur Beobachtung der umgebenden Lufttemperatur aufgehängt.

War nun vorher das Quecksilber auf etwa $30-40^{\circ}$ C. erwärmt worden, so bemerkte man die Luft, welche sich durch Berührung mit den Schalenwänden erwärmt hatte, in Form des in Fig. 3 gezeichneten Flammenkegels aufsteigen. Diese Erscheinung wird bei allmählicher Erkaltung immer schwächer. Ist die Luft ganz ruhig, so verschwindet sie scheinbar schon bei 3 bis 4° Temperaturdifferenz an *b* und *c*. Sie wird aber sofort wieder sehr deutlich, wenn man von der Seite die Vorrichtung gelinde anfacht, wobei man natürlich nicht mit der warmen Hand zu nahe kommen darf.

Jede Luftströmung disturbirt den sonst grade aufsteigenden, ruhigen Kegel und macht ihn sofort wieder sichtbar. Auf diese Weise habe ich die Luftschlieren bis zu $1,5^{\circ}$ Temperaturdifferenz bei nicht achromatischem, und ein anderes Mal bis zu $0,6^{\circ}$ bei achromatischem Kopf verfolgen können. Eine solche Empfindlichkeit hatte ich kaum erwartet. Die Distanz vom Kopf bis zum Analysator betrug 20 Fuss. Die von der erkaltenden Schale aufsteigenden Luftschlieren hatten sicherlich nicht die volle Temperatur der inneren Quecksilbermasse angenommen, so dass die wahre Temperaturdifferenz zwischen Luft und Schlierenkegel wohl noch kleiner sein mochte. Allein, setzen wir auch nur obige Zahlen als die thatsächlichen Differenzen voraus, so lässt sich leicht der Unterschied im Brechungsexponenten berechnen, welcher jener Temperaturdifferenz entspricht. Legt man für den Brechungsexponenten aus dem luftleeren Raume in Luft bei 0° die von *Arago*, *Biot* und *Dulong* übereinstimmend gefundene Zahl 1,000294, und für den Ausdehnungs-Coeffizienten der Luft die Zahl 0,3665 zu Grunde, so berechnet sich unter der Annahme, dass die brechende Kraft, d. h. das um die Einheit verminderte Quadrat des Brechungs-Coeffizienten, mit der Dichte proportional ist, für 1° Unterschied in der Temperatur die Differenz des Brechungsexponenten sehr nahe = 0,000001. Wie bemerkt, ist dies das mindeste Maass für die Empfindlichkeit der Methode. Ohne Zweifel ist die beobachtete Temperaturdifferenz, welche für die Mitte der Quecksilbermasse gilt, viel grösser, als die Differenz zwischen Schlieren-Kegel und Luft. Wählt man anstatt des Platin- ein sehr dünnes Glas- oder Porzellan-Schälchen, so verschwindet das Phänomen meist schon bei $3-5^{\circ}$ Differenz, offenbar wegen schlechter Leitung.

Der Versuch gelingt ebenfalls nicht in gleichgünstigem Maasse, wenn der erwärmte Körper von kleinen Dimensionen ist. Als ich die freischwebende Kugel des Thermometers *b* allein erwärmte und erkalten liess, so verschwanden alle Schlieren schon bei $6-7^{\circ}$ Differenz. Bei der kleinen Berührungsfläche vermischt sich die erwärmte Luft so schnell mit der kälteren, dass keine Brechungs-Verschiedenheiten in der Umgebung sichtbar werden. Auch bei festen, durchsichtigen Körpern gibt sich eine ungleichförmige Erwärmung leicht zu erkennen. Erwärmt man das Ende eines auf beiden Seiten plan geschliffenen Glasstreifens, so kennzeichnet sich das Ende im Schlieren-Apparat je nach der Einstellung entweder dunkel auf hellem, oder hell auf dunklem Grunde. (Fig. 4, Tafel II.) Wendet man zu diesem Versuche einen nicht achromatischen Kopf an, so erblickt man auf dem Streifen an der erwärmten Stelle eine prachtvolle Farbenscala. Auch Dichtigkeits-

Veränderungen durch Druck lassen sich durch den Schlieren-Apparat zeigen. Presst man eine plan-plane Platte *A* (Fig. 5) zwischen der bekannten Schraubenklemme ein, welche zu ähnlichen Versuchen im Polarisations-Apparat benutzt wird, so zeigt sich bei richtiger Einstellung eine partielle Verdunklung, welche an die bekannte Polarisations-Figur, die unter denselben Umständen entsteht, erinnert. Dass hier nur die eine Hälfte der Figur sichtbar wird, erklärt sich ohne besondere Erläuterung aus der Theorie des Schlieren-Apparates. Es ist ganz gleichgültig, ob die gepresste Platte rund oder eckig ist. Die Figur wird viel deutlicher, wenn die Pressbacken *b* und *c* dünner sind, als die Glasplatten. Dies scheint allerdings darauf hinzudeuten, dass wir es hier nicht allein mit einer Dichtigkeits-Veränderung, sondern auch mit einer Veränderung der ebenen Begränzungsflächen zu thun haben.

Eigenthümlich ist es, dass ich in gekühlten Platten, welche die bekannten farbigen Figuren im Polarisations-Apparat zeigen, im Schlieren-Apparat nicht die mindeste Veränderung bemerken konnte. Gewöhnlich sind die kleineren, als plan-plan bezeichneten Platten Prismen von sehr spitzem Winkel. Dies erfährt man sofort durch den Schlieren-Apparat, denn jene Platten erscheinen meistens im Gesichtsfelde dunkel auf Hell oder hell auf Dunkel, je nach der Einstellung, und es muss der empfindliche Punkt ganz besonders für dieselben aufgesucht werden.

Diffusions-Bewegungen flüssiger oder luftförmiger Körper im Schlieren-Apparat.

§ 5. Bringt man vor den Kopf des Schlieren-Apparates ein Schälchen, in welchem man in der Kälte ein farbloses Gas entwickelt, (etwa Kohlensäure, Wasserstoff etc.) so sieht man das Gas in sehr deutlichen Schlieren in die umgebende Luft diffundiren. Steigt das Gas aus einer Flüssigkeit in Blasen auf, so sieht man jede Blase nach dem Zerplatzen blitzartig im Gesichtsfelde emporfliegen. Man beobachtet hierbei zuweilen ganz ähnliche Phänomene, wie die bekannten Ringe, welche die selbstentzündlichen Gase Phosphor- und Silicium-Wasserstoff an der Luft bilden. Jede Schliere verschwindet meist sehr rasch durch vollständige Diffusion in der Umgebung.

Auch aus weiten mit den Gasen erfüllten Gefässen sieht man sie sehr leicht beim Oeffnen derselben vor dem Kopf diffundiren, und zwar bei leichteren Gasen durch Aufsteigen, bei schweren durch Ueberfliessen über den Rand der horizontal gestellten Gefässmündung. Lässt man Gase unter gelindem Druck aus feinen Oeffnungen strömen, so ist es sehr schwer, die Diffusions-Bewegung wahrzunehmen, weil hier die Vermischung mit der überflüssigen Luft zu rasch vor sich geht, um auffällig zu werden.

Es scheint, als ob Gase verschiedener Natur nicht mit gleicher Geschwindigkeit in atmosphärische Luft diffundiren. Wenigstens wird dies durch folgenden Versuch wahrscheinlich gemacht:

Aus einem mit Hahn versehenen Rohr von etwa 1 *cmtr.* Weite (einer gewöhnlichen Bunsen'schen Lampe) lasse man Leuchtgas ausströmen, und zwar bei senkrechter Stellung des Rohres. Ist der Hahn ganz geöffnet, so werden sofort die umgebenden Luftschichten heftig disturbirt. Bei allmähligem Zudrehen des Hahnes gelangt man zuletzt zu einer Ausflussgeschwindigkeit, bei welcher das Gas in Form eines ganz ruhigen, senkrechten Cylinders ausströmt, der wie ein solider Glasstab aussieht. Dieser Gascylinder lässt sich bei ganz ruhiger Luft oft bis zu einer Höhe von mehreren Fussen verfolgen, bevor er nach den Seiten sich ausdehnt und zuletzt verschwindet.

Wiederholt man denselben Versuch mit Kohlensäure, welche aus einem Gasometer strömt, indem man die Ausflussröhre senkrecht abwärts richtet, so sollte man einen ähnlichen ruhig herniedersinkenden Kohlensäure-Cylinder erwarten. Die Kohlensäure scheint sich jedoch bei aller Vorsicht viel früher in die umgebenden Luftschichten zu verbreiten.

Sehr bequem lässt sich der Gas- und Wärmeaustausch an der Oberfläche des menschlichen Körpers beobachten. Es genügt, die warme Hand unter die vordere Oeffnung des Kopfes zu bringen, um einen am Analysator stehenden Beobachter sofort aufsteigende Schlieren erblicken zu lassen. Aus den Oeffnungen der Rockärmel sieht man ganze Garben von flammenartigen Schlieren hervorbrechen, ja bei recht empfindlicher Einstellung kann man sogar den Austausch durch die dicksten Kleider hindurch beobachten. In kühlen Räumen erhebt sich über dem Kopfe einer jeden anwesenden Person eine viele Fuss hohe Schlierensäule, welche sich sehr leicht zeigen lässt. Diese Erscheinungen sind natürlich ausschliesslich oder zum bei weitem vorwiegenden Theile der Körperwärme zuzuschreiben. Ich glaube, dass bei einer bis zur Blutwärme gesteigerten Zimmertemperatur der Gasaustausch ganz unsichtbar werden würde.

Auch an frisch aus dem Freien gebrachten grünen Pflanzen-Zweigen kann man zuweilen von den Blattspitzen aus zarte Gasfäden herniedersteigen sehen. Allein auch hier sind wahrscheinlich Temperaturdifferenzen der Grund der Erscheinung, was mit genauen thermometrischen Instrumenten nachzuweisen wäre.

Die Diffusion der Dämpfe lässt sich mittels des Schlieren-Apparates mit derselben Leichtigkeit beobachten. Aus einer flachen Schale sieht man bei gewöhnlicher Temperatur flüchtige Flüssigkeiten unter lebhafter Schlierenbildung evaporiren. Wegen der geringen Spannung des Wasserdunstes ist es sehr schwierig, unter gewöhnlichen Verhältnissen das Wasser verdunsten zu sehen. Es gelingt mit Sicherheit nur, wenn die Zimmertemperatur mindestens 25—30° beträgt.

Alkohol sieht man sogar bei 0° noch lebhaft verdunsten, Aether bei Temperaturen weit unter 0°. Wegen des hohen spezifischen Gewichtes der Aetherdämpfe fliessen dieselben seitlich über den Rand des mit Aether gefüllten Gefässes, etwa wie in Fig. 6, Tafel II verzeichnet. Ueber dem Gefässe bildet sich eine ruhige, glänzende Dunsthülle, welche gegen den Rand hin gekrümmt ist. Die Höhe dieses Dunst-Spiegels über dem Gefässrande scheint ganz unabhängig von der Gestalt des Gefässes und der Verdunstungsfläche zu sein. Die Diffusions-Bewegungen beim Vermischen oder Erwärmen von Flüssigkeiten lassen sich ebenso bequem in trogartigen Gefässen mit zwei parallelen, plan-planen Glaswänden beobachten.

Untersuchung der Flammen.

§ 6. Interessantere Resultate verspricht der Schlieren-Apparat, auf die Untersuchung der Flammen angewandt. Bringt man die Flamme einer Kerze oder eines Gases hinter den Kopf, so bietet sich dem Beobachter im Analysator eine auffallende Erscheinung. Sofort bemerkt man, dass die Flamme viel breiter (meistens $2\frac{1}{2}$ bis 3 mal so breit) als dem blossen Auge erscheint. Die gewöhnliche Anschauung von zwei oder drei in einandergeschachtelten Zonen, aus denen die Flamme bestehen soll, erweist sich auf den ersten Blick als unzulänglich zur Erklärung sämtlicher Erscheinungen. Man erkennt ferner, dass bei verschiedenen brennenden Stoffen die Constitution der Flamme wechselt. Am deutlichsten werden die Erscheinungen, wenn das Gesichtsfeld nicht dunkel, sondern hell eingestellt ist, und zwar ganz nahe vor

der empfindlichen Einstellung. Bei der intensiven Helligkeit, welche in diesem Falle über das Gesichtsfeld verbreitet ist, bemerkt man von schwach leuchtenden Flammen gar nicht den mit blossem Auge sichtbaren Theil mit seinen Schichtungen. Die Fig. 7 bis 13 (Tafel II), welche verschiedene Flammen darstellen, sind daher zum grössten Theil Combinationen des mit blossem Auge und durch den Schlieren-Apparat beobachteten Flammenbildes.

Fig. 7 zeigt die Schichtung der Leuchtgasflamme, wie sie ein Bunsen'scher Brenner mit lebhaftem Luftzuge, also bei geöffneten Zuglöchern, erzeugt. *a* ist die mit blossem Auge sichtbare Flamme von bläulichem Lichte. In dieser zeigt sich deutlich eine hellere, schmale Schicht *b*, die sich beim Schliessen der Zuglöcher zur eigentlichen leuchtenden Flamme ausdehnt. Der Raum *c* ist dunkel. Im Schlieren-Apparat zeigt sich die ganze Flamme von einem weiten, sehr scharf begränzten Mantel *ee* umgeben, so dass die ganze Flamme in einer soliden Glashülle eingeschlossen zu sein scheint. Dieser scharf begränzte, äussere Mantel ist bei allen Flammen derselbe, nur mit verändertem Grössenverhältniss. Im dunkeln Raume *c* zeigt der Schlieren-Apparat einen sehr scharf begränzten, mit blossem Auge ganz unsichtbaren Kegel *d*, welcher, mit dem äusseren Mantel verglichen, entgegengesetzt schattirt ist. Auch dieser innerste Theil kehrt bei allen Flammen jedoch mit sehr beträchtlichen Veränderungen in Bezug auf Deutlichkeit und Grösse wieder.

Wenn bei starkem Gasstrome die Flamme in regelmässigen Zuckungen flackert, so ist das Bild derselben natürlich verworren. Wendet man in diesem Falle anstatt des gewöhnlichen Illuminators eine momentane Beleuchtung mittels des electrischen Funkens an (siehe unten die Einrichtung), so erblickt man die eigenthümliche Gestaltung Fig. 8. Der äussere Mantel ist in regelmässige Wellen getheilt, der innere Kegel *d* erscheint in aufsteigende Blasen zerrissen, welche nach oben immer kleiner werden. Fig. 9 zeigt dieselbe Gasflamme bei geschlossenen Luftlöchern. Der Mantel *ee* ist derselbe, *a* ist der mit blossem Auge sichtbare, sehr schmale, sogenannte oxydirende Saum der Flamme, *b* der stark leuchtende Reductionsraum, *d* endlich der innere, nur im Schlieren-Apparat sichtbare Kegel, welcher jedoch viel kleiner, als in Fig. 7 ist.

Die Flammen flüchtiger, brennbarer Flüssigkeiten zeigen, an einem Dochte verbrannt, analoge Schichtung. Fig. 10 zeigt die Flamme einer gewöhnlichen Weingeistlampe. *b* ist die schwach gelbliche, unten blaue, leuchtende Schicht. Der innere Kegel *d* ist hier im

Schlieren-Apparat sehr gross, wenn auch nicht so stark schattirt. Der oxydirende Saum ist nicht von *b* zu unterscheiden.

Die Flamme der Stearinkerze (Fig. 11) ist mit der leuchtenden Gasflamme fast ganz übereinstimmend. Nur ist der innere Kegel *d* hier so klein, dass ich ihn erst bei Anwendung stärkerer Vergrösserung und mit Hilfe des electricischen Illuminators auffinden konnte. Er erscheint als äusserst zarte, lichte Hülle um den Docht herum. Der äussere Mantel repräsentirt ohne Zweifel die stark erhitzten Verbrennungsproducte, vermischt mit überschüssiger erhitzter Luft. Es ist nur auffällig, dass der Mantel so scharf begränzt erscheint. Etwas ganz Analoges bemerkt man bei den von einem glühenden Körper aufsteigenden Luftschlieren. Wird eine an einem abwärts gekrümmten Drahte befestigte Metallkugel mässig erwärmt, so sieht man die Schlieren nur am oberen Theile unmittelbar von der Oberfläche aufsteigen. Wird aber die Kugel bis zum Dunkel-Rothglühen erhitzt, so ist auch die untere Hälfte der Kugel von einem Mantel umhüllt (Fig. 14), welcher, wie bei den Flammen, ganz scharf begränzt erscheint.

Der innere, bei allen Flammen ebenfalls scharfbegränzte Theil *d* ist je nach den Umständen verschieden zu erklären. Bei der Leuchtgasflamme besteht er wohl ohne Zweifel aus dem noch unveränderten Gase, resp. Gasgemische. Er ist in Fig. 9 nur wegen des stark verminderten Luftzuges kleiner, als bei der Flamme Fig. 7. Bei der Weingeistflamme ist *d* wohl noch unveränderter Alkoholdampf, der Siedetemperatur entsprechend, während bei der Stearinflamme jene Hülle um den Docht wahrscheinlich aus den nächsten Zersetzungs-Producten der Stearinsäure besteht.

Um diese Anschauungsweise zu rechtfertigen, war es mir interessant, die einfachsten aller Flammen, die des Wasserstoff- und des Knallgases zu vergleichen.

In Fig. 12 und 13 bedeutet *m* die Mündung der bekannten Gebläsespitze, wie sie beim Knallgas angewendet wird. Fig. 12 zeigt die Flamme, wenn Wasserstoff allein unter mässigem Druck ausströmt. Die Flamme besteht nur aus den 4 unterscheidbaren Theilen *e*, *a*, *c*, *d*. *d* erscheint als äusserst dünner, spitzer Kegel, der wie eine Nadel aus der Gebläseöffnung vortritt. Er kann in der That nichts weiter, als unverändertes Wasserstoffgas sein. Lässt man Sauerstoff zuströmen, so bildet sich die Fig. 13. Trotz des sehr verstärkten Gasstromes ist die Spitze *d* bis auf ein winziges Rudiment verschwunden, weil sich im Knallgas die Verbrennung rückwärts bis zur Mündung

fortpflanzt. *a* ist die mit blossem Auge sichtbare Knallgasflamme, *ee* der äussere Mantel.

Die mitgetheilten Beobachtungen über die Flamme sind sehr leicht anzustellen. Sie gelingen schon mit einfachen Apparaten und ganz roher Einstellung.

Die Beugungsphänomene im Schlieren-Apparat.

§ 7. Es ist ohne alle Erörterung leicht einzusehen, dass bei der »empfindlichen Einstellung« des Schlieren-Apparates unter Umständen irreguläre Strahlen durch Beugung in den Analysator gelangen können. In der That bemerkt man, wenn ein undurchsichtiger Körper vor den Kopf gebracht wird, gewöhnlich seine Umrisse mit goldig glänzenden Säumen eingefasst. Diese zarten Lichtlinien, welche auch den Rand des dunkel gestellten Gesichtsfeldes umfassen, bleiben sogar sichtbar, wenn das Diaphragma im Analysator weit über die empfindliche Stellung hinaus vorgeschoben ist.

Die bekannten Interferenz-Erscheinungen des gebeugten Lichtes lassen sich sehr leicht mit dem Schlieren-Apparate auf zweifache Weise anstellen:

1. Man vertauscht die kreisrunde Oeffnung des Illuminators mit einem sehr feinen Schlitz. (Dieser wird am besten erhalten, indem in ein auf Glas geklebtcs Staniolblatt mit einer feinen Messerspitze ein grader Schnitt vollführt wird.) Dieser Schlitz wird vor die Lampe etwa in verticaler Stellung gebracht. Vor den Kopf bringt man eine undurchsichtige Scheibe mit einer 2 bis 3 *mmtrs.* weiten Spalte, welche dem Illuminatorschlitz möglichst parallel steht. Stellt man nun an Stelle des Analysators einen Schirm (am besten eine matte Glastafel) auf, so sieht man das Bild der Illuminatorspalte mit den bekannten Interferenzstreifen zu beiden Seiten mit einer solchen Deutlichkeit und in solchen Dimensionen, dass man diese Anordnung äusserst bequem zur Demonstration in Vorlesungen benutzen kann. Diese Methode, die Interferenzstreifen objectiv darzustellen, ist der Hauptsache nach bekanntlich in der experimentalen Physik längst in Gebrauch.

Der Versuch gelingt auch, wenn man anstatt der Spalte vor dem Kopf einen schmalen dunklen Körper, etwa einen 2—3 *mmtrs.* breiten, geschwärtzten Metallstreifen aufstellt. In diesem Falle wird das reguläre Bild der Illuminatorspalte sehr hell, und muss, wenn die In-

terferenz-Spektren recht deutlich werden sollen, auf der von hinten betrachteten matten Scheibe abgeblendet werden.

2. Wesentlich verschieden ist folgendes Verfahren, nach welchem man die Interferenz-Wirkung nicht objectiv, sondern direct an den beugenden Kanten wahrnimmt. Der Illuminator-Schlitz wird mit einem gesättigten, rothen Planglase bedeckt. Vor den Kopf stellt man eine etwas engere Spalte, als beim vorigen Versuch ($1-1\frac{1}{2}$ mmtrs. weit); der Analysator ist vorher wieder richtig eingestellt, ist jedoch anstatt des gewöhnlichen Diaphragmas mit einem verschiebbaren Schlitz von $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ mmtrs. Breite versehen. Stehen die drei Spalten genau in einer Ebene, was mit grosser Sorgfalt zu bewerkstelligen ist, so sieht das Auge natürlich die Spalte am Kopf vergrössert und hell, umgeben von Interferenzlinien, welche erst durch die Analysatorspalte erzeugt werden. Schiebt man nun diese letztere Spalte langsam zur Seite, so verschwindet das Bild der Kopfspalte bei einer gewissen Stellung. Bei weiterem Verschieben erscheint es wieder, und so kann man dasselbe 2—3 mal verschwinden und wieder auftauchen sehen. Das Verschwinden ist kein vollständiges, da ja für diesen Fall die Analysatorspalte unendlich fein sein müsste. Wendet man anstatt homogenen Lichtes weisses an, so verschwindet selbstredend das Bild nicht, sondern ändert nur seine Färbung. Diese letztere Erscheinung, sowie auch die Wirkung eines an Stelle der Kopfspalte gesetzten schmalen, undurchsichtigen Körpers, ist nicht so deutlich, als die erstere. Ueberhaupt erfordert diese Art der Interferenz-Beobachtungen vorsichtige Handhabung des Apparates.

Sichtbarmachung der Schallwellen in der atmosphärischen Luft.

§ 8. Nach den in § 4 mitgetheilten Bestimmungen über die Empfindlichkeit der Methode konnte es mir nicht zweifelhaft sein, dass die Verdichtungen resp. Verdünnungen der Luft bei der Erzeugung und Fortpflanzung intensiver Schallschwingungen mittels des Schlieren-Apparates direct sichtbar gemacht werden können. Befindet sich in einem gewissen Moment eine kurze Schallwelle in geeigneter Lage vor dem Kopfe des Apparates, und beleuchtet man zugleich momentan das Gesichtsfeld, so muss die Schallwelle in wahrer Gestalt als Schliere erscheinen, falls die Intensität der Schwingung ausreicht,

um eine für den Apparat hinreichende Modification des Brechungsindex in der Luft zu veranlassen.

Zunächst wandte ich meine Aufmerksamkeit den regelmässigen Schwingungen zu, wie sie den musicalischen Tönen entsprechen. Als Illuminator diente mir der glänzende Funke einer Leidener Flasche, welcher in beliebigem Augenblicke zwischen zwei sehr nahe einander gegenübergestellten Metallstücken entladen werden konnte. Selbstverständlich ist es, dass ich nur mit sehr hohen Tönen operiren konnte, um mindestens eine ganze Wellenlänge vor dem Gesichtsfelde zu haben. Bei der Kleinheit der Köpfe, welche mir zur Verfügung standen, musste ich mich daher mit kurzen, gedeckten Holzpfeifen von nur 2 bis 4 *cmtrs.* Länge begnügen. Dieselben geben bekanntlich, wenn stark angeblasen, sehr scharfe Töne. Die Pfeifen wurden mit dem Mundstück auf einem Glasrohr befestigt, entweder vor oder dicht neben die Oeffnung des Kopfes aufgestellt. Das Glasrohr stand mit einem Blasebalg in Verbindung.

Es darf nicht Wunder nehmen, dass bei allen Versuchen diese kleinen Pfeifen ein durchaus negatives Resultat lieferten. Die Dichtigkeitsunterschiede in der schwingenden Luft waren selbst in nächster Nähe des Schallerregers zu gering, um mit meinen Hilfsmitteln sichtbar zu werden. Ich klemmte daher die Pfeifen zwischen zwei schlierenfreie, plane Glasscheiben ein und brachte diese in paralleler Stellung vor den Kopf des Apparates. Durch diese Anordnung werden die Tonwellen an ihrer Ausbildung zur Kugelform gehindert, es wird die Schwingungs-Intensität, so lange die Welle zwischen den Platten weilt, nicht im quadratischen, sondern dem einfachen Verhältniss des Abstandes von der Schallquelle abnehmen. Ich hoffte auf diese Weise in hinreichender Entfernung vom Schallerreger sichtbare Wellenschlieren zu erhalten. Allein auch dies Verfahren blieb ohne Erfolg. Unter gewissen Umständen erblickt man allerdings Klangfiguren auf den einschliessenden Glasplatten. Allein von Schallwellen in der eingeschlossenen Luft war nichts Nennenswerthes zu bemerken.

Anders verhielt es sich mit folgendem indirecten Verfahren. In § 5 gedachte ich des senkrechten Fadens, welcher sich über einem Rohre bildet, aus dem Leuchtgas langsam ausströmt.

Dieser Leuchtgasfaden, falls er in ruhiger Luft ganz senkrecht vor dem Gesichtsfelde aufsteigt, nimmt an den leisesten Bewegungen der umgebenden Luftmasse Antheil. Wird in der Nähe ein Ton erzeugt, und von Zeit zu Zeit das Gesichtsfeld momentan erhellt, so erscheint der Faden regelmässig gekrümmt, und lässt Schlüsse auf die Schwingungsbewegung der Luft zu. Da ich die hierhin schlagenden

Versuche noch nicht zum Abschluss gebracht habe, so muss ich ausführlichere Mittheilungen der Zukunft vorbehalten.

Allein auch das letztere Verfahren entsprach meiner Absicht nicht, in sofern es die Schwingungsbewegung der Luft nur mittelbar zur Anschauung bringt. So schien denn meine Methode an diesem einen Prüfstein, der directen Sichtbarmachung der Schallwellen scheitern zu wollen, als ich endlich darauf verfiel, sehr starke electriche Entladungen als Schallquelle zu benutzen. In der That war ich so glücklich, auf diese Weise die längst durch Rechnung aufgeschlossenen Bewegungsgesetze des Schalles auch dem Auge zugänglich zu machen, und zwar durch ein so sicheres Verfahren, dass die Versuche schon mit einem bescheidenen Schlieren-Apparate gelingen.

Das Wenige, was ich vorläufig mitzuthellen gedenke, folgt am Schlusse der Abhandlung, weil ich zunächst einige in nahem Zusammenhange stehende, interessante Beobachtungen über den electriche Funken vorausschicken muss.

Beobachtungen über den electriche Funken in atmosphärischer Luft.

Lässt man unter Benutzung des gewöhnlichen Lampen-Illuminators vor dem Kopfe des Schlieren-Apparates eine Reihe von electriche Funken überschlagen, so bemerkt man bei empfindlicher Einstellung nach jeder Entladung ein Schlieren-Wölkchen von dem Luft-räume aufsteigen, welchen der Funke durchschlagen hat. Es rührt dieses Wölkchen offenbar von erwärmter Luft her, welche der Funke auf seiner Bahn getroffen. Die Wölkchen zeigen sich, wenn auch schwach, beim Funken der Electriche Maschine, stärker bei der Entladung der Leidener Flasche, am stärksten aber bei dem galvanischen Inductionsfunken. Lässt man einen raschen Funkenstrom der letzteren Art (von 10 bis 12 Entladungen pro Secunde) zwischen zwei spitzen Electroden überschlagen, welche 2 *cmtrs.* von einander entfernt sind, so bildet sich in dem Schlagraum eine förmliche Schlierenflamme, am unteren Ende in lebhafter, wallender Bewegung begriffen, oben aber ruhig aufsteigend. Sehr merkwürdig ist es, dass diese Schlierenflamme lange nicht so breit ist, als der Schlagraum. Sie steigt ganz constant von einem Punkte auf, welcher nach übereinstimmenden Messungen um nahe 0,4 der obigen Schlagweite, von der negativen

Electrode gerechnet, entfernt ist. Wechselt man die Pole der Inductionsrolle, so kann man die Schlierenflamme von einer Seite des Schlagraumes zur andern wandern sehen. Der Inductionsfunken zeigt also nicht an allen Punkten seiner Bahn eine gleiche Wärmeentwicklung. Jener eine Punkt ist vor allen übrigen darin ausgezeichnet. Es ist dieser Punkt derselbe, welcher ein Minimum der Lichtentwicklung zeigt. Der ungeschwächte Inductionsfunken ist zu hell, um eine Ungleichförmigkeit in Bezug auf die Lichtentwicklung direct wahrnehmen zu lassen. Schaltet man aber in den Schliessungskreis einen grossen Widerstand, am besten eine lange, mit Wasser gefüllte Glasröhre ein, so erscheint der fadenförmige Funken matt-violettroth und zeigt an jener Stelle meistens eine Lücke, welche mit sehr schwach rothem Licht erfüllt ist. Gleichzeitig werden die von erwärmter Luft herührenden Schlieren fast bis zur Unsichtbarkeit abgeschwächt. Der fadenförmige galvanische Funken hat bekanntlich eine mit blossem Auge sichtbare, lichte Hülle. Auch diese steht mit obigem Maximalpunkte der Wärmeentwicklung in Beziehung. Hiervon später. Aus der besprochenen Thatsache erklärt sich ein einfacher, allbekannter Versuch. Bringt man zwischen die Electroden des Inductions-Apparates vielfach zusammengelegte Papierblätter, so werden nur die inneren Schichten verkohlt und schliesslich entzündet, falls zahlreiche Funken hindurchschlagen. Die äusseren Schichten in der Nähe der Electroden werden nur durchlöchert. Theilt man den Inductionsfunken der Länge nach, indem man mitten in den Schlagraum einen sehr kleinen Leiter einstellt, so zeigt jede der beiden Funkenhälften einen Maximalpunkt der Erwärmung und zwar bei beiden in derselben relativen Entfernung von der negativen Seite gerechnet.

Die Erwärmung in jenem Punkte der Funkenbahn muss in der That eine sehr beträchtliche sein, denn wenn man die Electroden bis auf 1 oder $\frac{1}{2}$ mmtr. nähert, so wird die Negative glühend, falls sie nicht zu dick ist. Wendet man hierbei sehr dicke Drähte als Electroden an, so sieht man im Schlieren-Apparat ebenfalls nur von der negativen Electrode erhitzte Luft aufsteigen. Die Luftschlieren, welche ich durch den Funken der Electricitätsmaschine oder Leidener Flasche erhielt, zeigten keinen derartigen ausgezeichneten Punkt.

Ein höchst merkwürdiges Bild zeigt der electricische Funken im Schlieren-Apparat bei momentaner Beleuchtung. Es war meine Absicht, die Verdichtungswelle, welche sich als Träger des Schalles von einem überspringenden electricischen Funken nach allen Seiten hin in der atmosphärischen Luft ausbreitet, sichtbar zu machen. Zu dem Ende liess ich den schallerzeugenden Funken dicht vor dem Kopfe

des Apparates überschlagen und liess sehr kurze Zeit hinterher einen zweiten Funken an Stelle des Illuminators das Gesichtsfeld beleuchten, und zwar geschah dies nach einem so kleinen Zeitintervall, dass sich die gebildete Schallwelle noch im Gesichtsfelde zeigen musste. Bevor ich auf die Beobachtungen selbst etwas näher eingehe, muss ich einige Worte über die Construction des electricischen Illuminators vorausschicken.

Zur momentanen Beleuchtung benutzte ich durchgehends den Funken der Leidener Flasche. Das Bild des Funkens wird, wie bei der früheren Construction, durch das Diaphragme des Analysators aufgefangen und abgeblendet. Es muss also das Bild scharf begränzt sein und stets auf derselben Stelle entstehen. Ich habe mich vergeblich bemüht, längere Funken, welche zwischen conischen Spitzen überschlugen, und deren Längsrichtung mit der Diaphragmenkante parallel gestellt war, zu benutzen. Der Weg, welchen der Funken zwischen zwei Spitzen in der Luft einschlägt, ist sehr veränderlich. Man sieht daher bei den aufeinander folgenden Blitzen das Gesichtsfeld bald blendend hell, bald ganz dunkel, kurz eine empfindliche Einstellung ist gar nicht möglich. Als die einzig brauchbare Form des electricischen Illuminators hat sich die folgende Anordnung bewiesen, welche durch das Schema Fig. 1 Tafel III versinnlicht ist. *C* bedeutet, wie früher, den Kopf. An Stelle des Lampen-Illuminators tritt der Henley'sche Auslader *A* mit den etwas gross gefertigten Kugeln *a* und *b*. Zwischen diesen springt der Funken einer Flasche *B* über, wie durch passende Leitung ermöglicht ist. Von den übrigen Theilen der Fig. 1 sehen wir vorläufig ganz ab.

Die Construction des Ausladers ist im Uebrigen ganz die gewöhnliche (Fig. 2.). Das Tischchen des Ausladers lässt sich sehr gut benutzen, um den Funken zu gewissen Zwecken unter schlecht leitenden Flüssigkeiten überschlagen zu lassen. Die Ausladerkugeln werden einander so sehr genähert, dass ihr Abstand nicht mehr als $\frac{1}{6}$ bis $\frac{1}{2}$ mmtr. beträgt. Der Funkenstrom, welcher sich bei rasch aufeinander folgenden Entladungen der Flasche *B* bildet, zeigt sich, durch eine starke Loupe betrachtet, etwa wie in Fig. 3 (Tafel III.). *a* und *b* sind die stark vergrösserten Ausladerkugeln, *o* ist der hellglänzende, dicke Funken, in welchem man stets die mit fortgerissenen Metalltheilchen als glühende Punkte erkennt. Die benachbarten Luftschichten *dd* zeigen ein mattes, fahlgelbes Licht, wahrscheinlich durch Reflexion. Man bemerkt ferner, dass der Funken nicht stets dieselbe Lage behält. Vielmehr oscillirt er sehr lebhaft um die kürzeste Entfernung der beiden Kugeln. Daher ist das Funkenbild nach der Richtung *dd*

(Fig. 3) sehr veränderlich. Um also eine empfindliche Einstellung ein für alle Male möglich zu machen, stellt man die Ausladerkugeln stets so ein, dass ihr kürzester Abstand senkrecht zur Diaphragmenkante des Analysators steht. Will man also die Diaphragmenkante vertical stellen (*gi* Fig. 3), so müssen die Kugeln in der Lage *ab* sich befinden. Auf diese Weise ist es möglich, den Funken nicht in axialer, sondern in der Richtung seines Querschnittes abzublenden. Die empfindliche Einstellung ist durch dieses Mittel trotz der Beweglichkeit des Funkens gesichert. Erfordert die Schlieren-Beobachtung eine horizontale Lage des Diaphragmas, so sind die Ausladerkugeln wie in Fig. 2 zu stellen u. s. w. Es bedarf kaum der Erwähnung, dass man den Funken durch ähnliche Kunstgriffe genau in die optische Axe des Kopfes bringen kann, wie sie beim Lampen-Illuminator besprochen wurden.

Wenn zwischen den Kugeln des Ausladers eine Reihe von Entladungen stattgefunden hat, so bedecken sich die einander gegenüberstehenden Flächentheile mit einem matten Ueberzuge, von den mechanisch mit fortgerissenen, zum Theil oxydirten Metallpartikeln herrührend. Dieser Ueberzug ist bei kupfernen oder messingenen Kugeln schwarz gefärbt. Er verhindert ganz von selbst eine Spiegelung des Funkens auf den benachbarten Flächentheilen der Kugeln, ein Umstand, welcher die scharfe Begränzung des Funkenbildes auf dem Diaphragma wesentlich unterstützt.

Das Schema Fig. 1, Tafel III veranschaulicht ausser der eben besprochenen Beleuchtungsvorrichtung eine Anordnung, wie ich sie zur Beobachtung des electricischen Funkens sowohl bei andauernder, als bei momentaner Beleuchtung benutzt habe. Zur Erregung gespannter Electricität diente mir fast ausschliesslich ein kräftiger Ruhmkorff'scher Inductions-Apparat *R*, welcher, mit 3 grossen Bunsen'schen Elementen *K* verbunden, bequem Funken von 2 *cmtr.s.* Schlagweite lieferte.

Es bedeuten *u* und *r* die Enden der Haupt-, *l* und *m* die der Nebenspirale. (Commutator und Interruptor sind in der Fig. weggelassen).

Die Enden der Inductionsspirale *l* und *m* sind nun zunächst mit zwei Glascylindern *D* und *E* verbunden, in welchen sich Quecksilber befindet. *D* ist sehr dünnwandig und enger als *E*, so dass man Ersteres sehr leicht ganz oder zum Theil in *E* einsenken kann. In letzterem Falle bilden die beiden Cylinder eine dünnglasige Leidener Flasche von veränderlicher Oberfläche. Fig. 5 zeigt ohne alle Erläuterung, wie *D* und *E* in verschiedener gegenseitiger Lage festgestellt werden können.

Die in Fig. 1 verzeichnete Drahtverbindung macht es nun möglich, ganz nach Belieben den gewöhnlichen Inductions- oder Flaschen-Funken bei momentaner oder dauernder Beleuchtung im Schlieren-Apparate zu beobachten. In allen Fällen schlägt zwischen f und g der zu beobachtende Funken über, während sich zwischen ab der Beleuchtungsfunken entladet. In der Richtung nach x hin ist der Analysator in einer Distanz von 5 bis 8 Fuss aufgestellt. Ich wählte zu sämtlichen Beobachtungen diese kleine Entfernung und gleichzeitig eine 8 bis 12malige Vergrößerung des Analysator-Fernrohres wegen der Kleinheit des Beobachtungs-Objectes.

Man kann nun je nach dem Zwecke der Beobachtung folgende Fälle unterscheiden:

1. Es soll der Inductionsfunken bei momentaner Beleuchtung betrachtet werden. Zu diesem Zwecke wird D ganz aus E hervorgezogen, so dass es frei schwebt. Der Strom verläuft von l einerseits über D , k , h nach g , überspringt die Unterbrechung gf und gelangt über v , e , d , w zur inneren Belegung der Flasche B ; die äussere Belegung steht durch n , E und m in directer Verbindung mit dem anderen Pol der Inductionsspirale. Bekanntlich tritt bei einer derartigen Einschaltung einer Flasche in den Schliessungskreis eine Verzögerung in der Entladung ein, so dass ein kleines Zeitintervall zwischen dem Ueberspringen des Inductionsfunkens und der Entladung der Flasche über w nach c , b , a , q , p , o , B verfliesst. Dieses Zeitintervall kann der Experimentator in gewissen Grenzen verändern. Es hängt nämlich die Retardation der Entladung einerseits von der Grösse der Flaschen-Belegung, andererseits von dem Schlagraum bei ab ab.

Je nachdem man also diese Factoren willkürlich verändert, kann man in fast beliebig kleinen Zeiträumen nach der Entladung bei fg die daselbst bewirkte Veränderung der Luft beobachten.

Anstatt der Leidener Flasche B habe ich zu sehr vielen Versuchen einen Condensator angewendet, wie er durch Fig. 6 und 7 veranschaulicht ist. Ich kann denselben wegen seiner sehr compacten Form und der Leichtigkeit, mit welcher sich die Grösse der Belegung ändern lässt, zu allen Versuchen über gebundene Electricität empfehlen. Die Construction desselben stellt in der That nichts weiter, als eine Säule von Franklin'schen Tafeln dar. Man sichtet Scheiben von gut gereinigtem, gewöhnlichem, grünem Fensterglase abwechselnd mit Staniolblättern auf, welche allseitig um etwa 2 Zoll vom Glasrande abstehen. Auf der einen Seite der Plattensäule verbindet man die Staniolblätter 1, 3, 5 u. s. w., auf der anderen die Blätter 2, 4, 6 etc.,

indem man breite, sehr dünn gewalzte Kupferstreifen in Berührung mit dem Staniol unter die Glasplatten mit einlegt und entsprechend umbiegt (Fig. 7.). Auf den letzten Staniolblättern liegen dickere Kupferplatten, welche seitlich in Form eines Ringes hervorragen. Man sieht, dass bei dieser Anordnung im Vergleich zur Flaschenbatterie die Hälfte der Belegung erspart wird. Will man die Säule zu einem soliden Ganzen vereinigen, so umbindet man sie möglichst fest mit starken Seidenschnüren, indem man auf die Glasränder seitlich breite Streifen von Wachstaffet oder Gutta-Percha-Papier auflegt, damit die Glasränder durch Anfassen mit der feuchten Hand nicht leitend werden.

Schaltet man diesen Condensator an Stelle der Flasche *B* in Fig. 1 ein, so ladet er sich bei jedem Funken des Inductors mit einem eigenthümlichen, brodelnden, hohlen Geräusch. Gibt man ihm eine Belegung von 20 bis 25 Fuss, so ist er recht geeignet, Schmelzung dünner Dräthe u. s. w. vorzunehmen. Man hüte sich bei seinem Gebrauch vor den Ladungs-Residuen, welche oft noch längere Zeit nach dem Gebrauch empfindliche Erschütterungen mittheilen.

2. Beabsichtigt man, anstatt des Inductionsfunken den Funken der Leidener Flasche zu betrachten, so hat man nur den Cylinder *D* in das Quecksilber von *E* zu tauchen. Alsdann ladet sich bei der Thätigkeit des Inductors zunächst die Vorrichtung *DE*. Diese entladet sich über *gf* und *En* in die Flasche *B*, und letztere endlich liefert nach einem gewissen Zeitintervall den Beleuchtungsfunken bei *ab*. Sollen sich die zwischen *gf* spielenden Inductionsfunken vollständig in die ihrer Natur nach so wesentlich verschiedenen Flaschenfunken verwandeln, ohne an Schlagweite einzubüssen, so muss zwischen der eingetauchten Glasfläche von *D* und der Stärke des Inductionsstromes ein bestimmtes Verhältniss obwalten, ein Verhältniss, von welchem später noch einmal die Rede sein wird. Als Entladungs-Vorrichtung bei *fg* dient ohne Zweifel am besten ein Poggendorff'sches Funkenmicrometer. Zu den meisten Versuchen bediente ich mich der einfachen Vorrichtung Fig. 4. *g* und *f* sind zwei zugespitzte Platin-Electroden von 1 *mmtr.* Dicke. Dieselben sind mit Oesen zur Aufnahme der Leitungsdrähte versehen und lassen sich leicht in zwei durchbohrten Korken verschieben. Beide Korken sind durch Glassäulen isolirt, welche sich ebenfalls leicht in ihren Füßen drehen lassen. Durch gelinde Drehung der Säulen in entgegengesetztem Sinne kann man sehr geringe Veränderungen in der Schlagweite erzielen.

3. Entfernt man die Flasche *B* ganz aus der Combination Fig. 1, so erfolgt die Entladung direct über *l, D, k, h, f, v, e, a, b, a, q, o,*

E und *m*. In diesem Falle kann man ohne Fehler die Funken bei *fg* und *ab* als gleichzeitig betrachten, sei es nun, dass man mit oder ohne die Vorrichtung *DE* arbeitet.

4. Will man endlich den Funken bei *fg* in andauernder Beleuchtung des Gesichtsfeldes betrachten, so entfernt man *B* und *A* zugleich, während man eine leitende Verbindung zwischen *d* und *n* herstellt, und den Lampen-Illuminator benutzt.

Ich habe in Vorhergehendem die Anordnung des Apparates erörtert, um den späteren Gang der Auseinandersetzungen nicht zu unterbrechen. Das Bild des electrischen Funkens bei andauernder Beleuchtung beschrieb ich zu Anfang des Paragraphen. Gehen wir nun zu den Erscheinungen über, welche sich bei momentaner Beleuchtung herausstellen.

A. Der Inductionsfunken.

Der Inductionsfunken ist bekanntlich von dem Funken der Leiden-Flasche und Electricirmaschine sehr verschieden. Während letztere beiden dem Auge als fadenförmige Gebilde erscheinen, ist der Inductionsfunken von einer deutlichen Lichthülle umgeben, deren Farbe und Helligkeit je nach der Natur der Electroden und des durchschlagenen Gases wechselt. In der atmosphärischen Luft ist sie schwach röthlich und umgibt die negative Electrode mit violettem Glimmlichte. Die Lichthülle ist nicht überall gleich breit. Es fiel mir zunächst auf, dass sie an der bereits mehrfach erwähnten Stelle der grössten Erwärmung am breitesten erscheint. Fig. 8 Tafel III ist ungefähr das Aussehen des Inductionsfunken von 2 *cm*ts. Schlagweite. Nach den Untersuchungen von *Perrot*, *Du Moncel*, *Plücker* u. A. lässt sich die lichte Hülle durch starke Luftströme, rasche Bewegung der Electroden, Einwirkung kräftiger Electro-Magnete u. s. w. von dem fadenförmigen Theile des Funkens trennen. Namentlich sind es die Versuche von *Perrot*, welche über das Wesen jener Lichthülle Aufschluss ertheilt haben. Nach der herrschend gewordenen Ansicht durchbricht zunächst ein fadenförmiger Funken die Luftschicht, welche die Electroden trennt, falls die dem Oeffnungsstrom entsprechende Spannung hinreichend angewachsen ist. In dem durch Erhitzung oder mechanische Gewalt auseinandergesprengten Luftraume entladet sich nun der ganze Oeffnungsstrom und veranlasst die oben besprochene Lichthülle, analog dem Lichte der Geissler'schen Röhren. Im Vergleich mit diesem letzten Stadium der Entladung ist der anfängliche fadenförmige Funken nur eine momentane Erscheinung. Die der Lichthülle entsprechende

Stromentladung folgt in ihren Wirkungen auf die Magnetnadel etc. dem Ohm'schen Gesetz, wie *Perrot* nachwies. Beide Erscheinungen fallen für das Auge nur deshalb zusammen, weil ihre Dauer eine sehr kurze ist.

Die Beobachtung des Inductionsfunken im Schlieren-Apparat liefert für obige Ansicht die directe Bestätigung, falls man sich momentaner Beleuchtung bedient. Stellt man den Interruptor des Inductions-Apparates so, dass etwa 6 bis 8 Funken pro Secunde zwischen *f* und *g* Fig. 1 überspringen, und gibt man der Beleuchtungsflasche *B* nicht mehr als 2 bis 4 Quadratfuss Oberfläche, so sieht man im Allgemeinen die in Fig. 9 Tafel III dargestellte Erscheinung. Um das Bild vollständig zu überblicken, darf man das Gesichtsfeld nicht zu dunkel einstellen. Der Pfeil bedeutet auch hier, wie früher, die Richtung, in welcher das Diaphragma vorgeschoben wird. *ab* ist der fadenförmige Funken. Die lichte Hülle verschwindet in der allgemeinen Helligkeit des Gesichtsfeldes. Anstatt dessen erscheint aber der Funken in einen sehr scharf nach Aussen begränzten Mantel *c* gehüllt, welcher durch seine Schattirung wie ein solider Glaskörper aussieht. Dieser Mantel ist vielfach ausgebaucht, am stärksten an der schon früher besprochenen Stelle in der Nähe der negativen Electrode. An derselben negativen Seite erscheint noch ein zweiter, viel breiterer, aber schwachbegränzter Mantel *dd*, und über dem Ganzen erhebt sich die schon beschriebene Schlierenflamme *e*, den aufsteigenden, erwärmten Luftstrom anzeigend.

Der innere Mantel ist in der Längsrichtung des Funken geschichtet. Dies sieht man sehr deutlich, wenn man die Diaphragmenkante senkrecht zur Funkenachse stellt. Alsdann erscheint, wie in Fig. 10, der Funkenmantel wie aus Glasperlen zusammengesetzt, welche auf den centralen Faden aufgereiht sind.

Das Bild Fig. 9 ist natürlich in beständigem Wechsel begriffen, weil die Entladungen so rasch einander folgen, und keine derselben genau das Bild der vorhergehenden liefert. Allein die Theile *c* und *d* verändern ihre Gestalt und Grösse doch so wenig, dass man sie ziemlich gut messen und aufzeichnen kann.

Was nun zunächst den inneren, scharf markirten Mantel betrifft, so schien es mir von vorn herein sehr wahrscheinlich, dass er nichts weiter, als jener hypothetische, durch den Funken auseinander gesprengte Luftfaden sei, durch welchen sich, wie oben besprochen, die Lichthülle nach dem Ohm'schen Gesetz entladet. In der That lässt sich auch der Funkenmantel *c* durch heftige Luftströme etc. vom fadenförmigen Funken trennen. Bläst man zwischen den etwas genäher-

ten Electroden aus einem Rohr von etwa 1 *cmtr.* Weite einen Luftstrom von $1\frac{1}{2}$ bis 2 *Litres* pro Secunde hindurch, so erscheint dem blossen Auge die Lichthülle wie eine ausgefranzte Flamme (Fig. 11), welche einseitig von dem fadenförmigen Funken *ab* begränzt ist. In dieser Flamme bemerkt man oft hellere Streifen gekrümmt von *a* nach *b* verlaufen. Im Schlieren-Apparat trennt sich der glasartige Mantel durch Anblasen ganz vollständig vom Funken, wie Fig. 12 zeigt. Er ist auch an der unteren Seite *c* vollständig scharf begränzt. Das seitliche Anhaften der Lichthülle Fig. 11 am Funken *ab* ist also ein blosser Schein, veranlasst durch die Dauer des Lichteindruckes im Auge. Die Lichthülle entfernt sich, dem Luftstrom folgend, allmählig weiter und weiter von *ab*, scheint daher in die Breite gezogen.

Das Bild Fig. 12 beweist zugleich, dass der glasartig aussehende Funkenmantel nicht etwa eine vom Funken ausgehende Schwingungswelle ist. Berechnet man die Geschwindigkeit des Luftstromes zwischen den Electroden und vergleicht sie mit der Schallgeschwindigkeit, so erkennt man sofort, dass eine nach den Gesetzen des Schalles fortgepflanzte Stossbewegung ein ganz anderes Bild liefern müsste.

Um Verwechselungen vorzubeugen, hebe ich hervor, dass ich mit dem Ausdrucke Lichthülle in der Folge stets die mit blossen Auge sichtbare Hülle des Fadenfunken bezeichne, während die Bezeichnung Funkenmantel für das Phänomen im Schlieren-Apparat beibehalten werden soll. Beides sind Dinge, welche nicht nothwendig gleichzeitig vorhanden sein müssen.

Zur vollständigen Erklärung der Fig. 9 handelt es sich noch um das Wesen des äusseren Mantels *dd*. Bedenken wir, dass Fig. 9 gleichsam eine Summe von Bildern darstellt, hervorgerufen durch die rasch aufeinander folgenden Entladungen, so ergibt sich die Lösung von selbst. Ich hob die Verbindung zwischen der Kette *K* (Fig. 1) und dem Inductor bei *rs* auf und führte von *r* und *s* lange Drahtstücke bis zum Analysator. Hier war eine Schlüsselvorrichtung, ähnlich dem Schlüssel des Morse'schen Telegraphen so aufgestellt, dass der Beobachter sie bequem handhaben konnte. Bei einiger Fertigkeit gelingt es sehr leicht, den Schlüssel so rasch niederzustossen, dass bei der kurzen hierdurch hervorgerufenen Schliessung der Hammer des Inductions-Apparates jedesmal nur zu einem einzigen Schlage Zeit hat. Man sieht bei diesem Experiment, man mag es noch so oft wiederholen, um den Inductionsfunken stets nur den inneren Mantel *c* Fig. 9, alles Andere fällt weg.

Drückt man aber zu wiederholten Malen den Schlüssel etwas länger nieder, so dass der Interruptor jedesmal Zeit zu 2, höchstens

3 Schlägen hat, so sieht man stets beide Mäntel *c* und *d* Fig. 9. Hält man den Schlüssel endlich beliebig lange nieder, so bemerkt man ausser den beiden Mänteln auch noch die Schlierensäule *e*.

Diese Versuche beweisen ohne alle Erörterung den Verlauf der Erscheinungen. Sehr kurze Zeit nach dem Uebergange des ersten beobachteten Funkens entladet sich der Illuminatorfunken und macht den Mantel *c* sichtbar. Schlägt nun ein zweiter Inductionsfunken über und gleich nach ihm der entsprechende Funken im Illuminator, so erscheint an Stelle des ersten ein fast gleich gestalteter zweiter Mantel bei *c*. In der Zwischenzeit, also in $\frac{1}{6}$ bis $\frac{1}{8}$ Secunde, hat sich der vorige innere Mantel, weil er aus erwärmter Luft bestand, zu dem wulstförmigen, äusseren Mantel *dd* ausgebildet; dieser kommt aus bekannten Gründen hauptsächlich in der Nähe der negativen Electrode zu deutlicher Entwicklung. Hat sich endlich die durch den ersten Funken erhitzte Luftmasse vermöge ihrer allmählichen Ausdehnung mit der Spannung der umgebenden Atmosphäre ins Gleichgewicht gesetzt, so beginnt sie aufzusteigen und erscheint bei späteren Entladungen als Schlierenkegel *e*.

Dass diese Erklärung die richtige, beweist auch der folgende Versuch. Man entferne aus der Anordnung Fig. 1 die Flasche *B*, so springt der Inductionsfunken so gut wie gleichzeitig bei *fg* und *ab* über. Die Beleuchtungsintensität nimmt hierdurch natürlich sehr ab. Das Schlierenbild hat alsdann das Aussehen der Fig. 13. Der innere Mantel fehlt, der äussere *dd* ist sehr deutlich. In diesem Falle beleuchtet jeder Funken sich gleichsam selbst, bevor sich der innere Mantel bilden kann. Gleichzeitig beleuchtet er aber auch den Mantel des voraufgegangenen Funkens, der sich also, wie man sieht, in der Zwischenzeit zu der Form *dd* ausgebildet hat. Ist bei diesem Versuche die Luft recht ruhig, so erkennt man in den aufsteigenden Schlieren *e* Fig. 13 noch sehr deutlich die Abtheilungen, welche den einzelnen Mänteln entsprechen. Ein sehr gutes Auge erkennt ferner bei dem letzteren Versuch immer noch Spuren des inneren Mantels, welche wie ein neblig verwaschener Cylinder den fadenförmigen Funken umgeben. Dies kommt ganz einfach daher, weil in dem vorliegenden Falle der Beleuchtungsfunken bei *ab* Fig. 1 kein Flaschenfunken, also auch keine momentane Entladung ist. Der innere Mantel, welcher sich um den Funken bei *fg* bildet, ist nun vom Anfange der Entladung an in beständiger Ausdehnung begriffen, wie durch spätere Versuche nachgewiesen wird. Es muss also in der That ein mattes, verwaschenes Bild desselben sich zeigen, falls, wie bei dem in Rede stehenden Versuch, der Inductionsfunken sich selbst beleuchtet.

Um nun die Frage über die Natur des Funkenmantels zum vollständigen Abschluss zu bringen, blieb noch zu untersuchen übrig, ob die Erzeugung des Mantels einzig und allein dem fadenförmigen Theile des Inductionsfunken zuzuschreiben sei, oder aber, ob und welchen Antheil der zweite Theil der Entladung in Form der Lichthülle an der Ausbildung jener Erscheinung nimmt.

Die Antwort auf diese Frage lässt sich in folgenden beiden Sätzen zusammenfassen:

1. Die Existenz des Mantels im Schlieren-Apparat ist durchaus an den fadenförmigen Funken gebunden. Man beobachtet den Fadenfunken nie ohne Mantel, wenn ihm auch die Lichthülle fehlt.

2. Folgt auf den Fadenfunken eine Lichthüllen-Entladung, wie es beim Inductionsfunken ja durchgehends der Fall ist, so dehnt sich während der Dauer der Lichthülle der bereits präformirte Mantel beträchtlich aus, wahrscheinlich durch steigende Erwärmung.

Im Folgenden will ich die wichtigsten Versuche mittheilen, von welchen obiges Resultat abstrahirt ist.

Zunächst gelingt es, unter gewissen Umständen zwischen den Electroden *gf* Inductionsfunken ohne Lichthülle zu erzielen. Entfernt man die Electroden bis auf die äusserste Gränze der Schlagweite, so ist der Funkenstrom intermittirend. Viele der dann überschlagenden Funken entbehren alsdann der Lichthülle. Sie zeichnen sich durch schwachen, aber spitzen Schall aus und sind meistens stark zickzackförmig gekrümmt. Für die Lichthüllen-Entladung ist in diesem Falle der Widerstand zu gross. Die Funken sind in Allem dem gewöhnlichen Funken der Electricirmaschine analog. Beobachtet man diese Gränzfunkken im Schlieren-Apparat bei unveränderter Anordnung des Flaschen-Illuminators, so zeigt sich immer noch ein Mantel, welcher wie ein sehr dünnes Röhrchen den Funken umgibt. Die Erscheinung ist nur dann deutlich von dem Funken selbst zu unterscheiden, wenn man das Licht des Illuminators durch ein rothes Planglas färbt.

Deutlicher zeigt sich der Funkenmantel ohne die Lichthülle beim Flaschenfunken. Senkt man *D* Fig. 1 tief genug in *E* ein, so verschwindet die lichte Hülle des Inductionsfunken bei *fg*, indem er sich in den laut schallenden, rein fadenförmigen Flaschenfunken verwandelt. Auch hier zeigt sich stets noch der scharf begränzte Mantel, jedoch ebenfalls viel schmäler und an den Rändern ganz unregelmässig ausgezackt, wie zerrissen. Die Erscheinung gleicht etwa der Fig. 1, Tafel IV. Die von erwärmter Luft herrührenden, aufsteigenden Schlie-

renwölkchen erscheinen beim Flaschenfunken zertheilt und regellos auseinander gesprengt.

Nie habe ich beim isolirten Fadenfunken eine Spur des zweiten, äusseren Funkenmantels *dd* Fig. 9, Tafel III, entdecken können.

Das Glimmlicht, aus welchem die Hülle des Inductionsfunken besteht, scheint an und für sich keine Fähigkeit zu besitzen, einen Mantel im Schlieren-Apparat zu erzeugen. Dies deuten wenigstens die beiden folgenden Versuche an:

Nähert man zwei dünnwandige, geknickte Glasröhren Fig. 2 Tafel IV, welche man mit Quecksilber gefüllt und verkorkt hat, bis auf 1 oder $1\frac{1}{2}$ Linien mit ihren parallelen Schenkeln, so zeigt sich ein violettrothes Glimmlicht zwischen den Röhren, sobald man das Quecksilber mit den Polen der Inductionsspirale verbindet. Hierbei entwickelt sich bekanntlich ein starker Ozongeruch. Das Glimmlicht verschwindet auch dann nicht, wenn man zwei Nebendrähte *cd* und *fg* durch die Korke einführt und ihre Enden so sehr nähert, dass zwischen *f* und *c* ein lebhafter Funkenstrom übergeht. Bringt man diese ganze Vorrichtung in einer solchen Lage vor den Schlieren-Apparat, dass die Richtung *ab* Fig. 2 mit der optischen Achse zusammenfällt, und biegt die Drähte *fg* und *cd* so um, dass die Funkenentladung über *ab* im Gesichtsfelde erscheint, so zeigt das Glimmlicht keine Spur eines Mantels, während die Funken nach wie vor von einem solchen umgeben sind.

Es ist ferner bekannt, dass eine zwischen die Electroden gebrachte Flamme die Schlagweite sehr vergrössert. Die Entladungen meines Inductors erfolgten bei Anwendung einer gewöhnlichen Kerzenflamme noch bei 5 *cmtrs.* Abstand der Electroden. Wo der Funken den leuchtenden Flammentheil durchläuft, steigert er die Helligkeit bis zum blendenden Weiss. Bei grosser Schlagweite beobachtet man die Thatsache, dass der Funken in den tieferen Regionen der Flamme nie die centralen Schichten *c* und *d* (siehe § 6), sondern stets die Theile *a* und *b* zu seinem Uebergange wählt. Befinden sich die Electroden ganz ausserhalb der Flamme und auch ganz ausserhalb des früher besprochenen äusseren Flammenmantels *ee* Fig. 3 Tafel IV, so bemerkt man, wie der Funken, welcher nun zum Theil durch die umgebende Luft geht, sich auffallend verschieden auf dieser Bahn zeigt. Am besten erkennt man die Verschiedenheit in schwachleuchtenden, z. B. den Weingeistflammen. Zwischen den Electroden und dem äusseren Flammenmantel, also bei *mp* und *qn* Fig. 3 besitzt der Funken wie gewöhnlich einen centralen Faden. Dieser verschwindet schon im äusseren Mantel *ee* der Flamme, indem er sich in einen breiten Licht-

streifen pq verwandelt. Am breitesten ist der Streifen in der eigentlichen Flamme bb . Betrachtet man nun diese Funken im Schlieren-Apparat, so bemerkt man einen glasartigen Funkenmantel nur um die fadenförmigen Theile mp und nq . Der Funkenmantel erscheint mit dem Flammenmantel innig verwachsen, so dass Ersterer aus Letzterem in Form zweier Zipfel hervorsteht. Um den mittleren, breiten Funkentheil pq habe ich nicht die Spur eines Mantels entdecken können. Der Flammenmantel und die Flamme selbst dient hier der Lichthüllen-Entladung als leitendes Medium. Ich glaube, dass kein Versuch so unzweideutig, wie dieser letztere, die Bedeutung des Funkenmantels erläutert.

Es wurde oben bemerkt, dass während der Lichthüllen-Entladung der vom Fadenfunken präformirte Mantel in rascher Ausdehnung begriffen sei, wahrscheinlich in Folge der steigenden Erwärmung. Dies folgt ganz einfach aus der Beobachtung, dass der isolirte Fadenfunken an der Gränze der Schlagweite (siehe oben) gewöhnlich einen Mantel von fast unmessbar kleinem Durchmesser besitzt, während bei den von einer Lichthülle umgebenen, gewöhnlichen Inductionsfunken der Mantel viel breiter ist. Die Ausdehnung ist ferner eine stetige, denn Alles, was das Zeitintervall zwischen dem Beobachtungs- und dem Beleuchtungsfunken vergrössert, lässt auch den Funkenmantel, (es ist natürlich nur von dem inneren die Rede), breiter erscheinen; man kann sich hiervon durch Versuche leicht überzeugen. Wurden die Ausladerkugeln des Illuminators bis fast zur Berührung genährt, und betrug die Belegung der Beleuchtungsflasche nicht mehr als 2 Quadratfuss, so war der Mantel meist ziemlich glatt cylinderförmig und etwa 2 *mmtr.* breit. Entfernte ich die Ausladerkugeln bis auf $\frac{1}{2}$ *mmtr.* Abstand und wandte 3 bis 4 Quadratfuss Belegung an, so erschien der Mantel in natürlicher Grösse, wie in Fig. 9 und 10 Tafel III abgebildet. Wurde endlich ein 18füssiger Condensator in den Illuminator eingeschaltet, so dehnte sich der Mantel noch mehr aus und erschien wie in Fig. 4 Tafel IV.

Die Ausbildung des Mantels geht zu Anfang natürlich unverhältnissmässig rascher von Statten, als in längeren Zeitabschnitten nach der Entladung. Die Zeitdauer zwischen je zwei Entladungen des Inductors, in welcher also aus dem inneren Mantel c der äussere dd hervorgeht, ist ja über allen Vergleich grösser, als das Zeitintervall zwischen Beobachtungs- und Beleuchtungsfunken.

Die letzten Versuche beweisen schliesslich, dass auch die Lichthülle des Inductionsfunken während der Entladung ihren Durchmesser ändert. Diesem Umstande ist es wahrscheinlich zuzuschreiben, warum

dieselbe seitlich so wenig scharf begrenzt erscheint. Wäre es möglich, die Verzögerung zwischen Beobachtungs- und Beleuchtungsfunken ganz genau zu bemessen, so würde man aus der Breite der Lichthülle, falls sie sich ebenfalls messen liesse, auf die wahre Dauer des Oeffnungs-Inductionsstromes schliessen können.

B. Der Flaschenfunken.

Senkt man das Quecksilbergefäss D allmählig in E Fig. 1 Tafel III ein, während der Inductions-Apparat in Thätigkeit ist, so erfolgt eine allmähliche Veränderung im Aussehen des Funkens bei fg . Der Fadenfunken wird immer heller und schallender, die Lichthülle wird immer schwächer, bis sie zuletzt ganz verschwindet. Gleichzeitig sieht man an der Aussenfläche von D dünne, sehr verästelte Funken aus dem Quecksilber in E emporschlagen. Hat man nun vorher die Electroden f und g so weit von einander entfernt, als es die Schlagweite der unveränderten Inductionsfunken erlaubt, so weit also, dass eine grössere Entfernung den Funkenstrom intermittirend machen würde, so zeigt sich beim Einsenken von D Folgendes:

Es gibt eine Gränze, bis zu welcher man D eintauchen muss, um den Inductionsfunken vollständig in den Flaschenfunken umzuwandeln, ohne seine Schlagweite sich verändern zu sehen. Taucht D noch tiefer ein, so hört der Funkenstrom auf, und man muss die Electroden nähern, um ihn wieder hervorzurufen. Die Erscheinung erklärt sich ganz einfach. Gesetzt die von D eingetauchte, bindende Oberfläche sei sehr klein, so wird der Strom zunächst diese Fläche laden, und zwar bis zur vollen Spannung, welche dem Oeffnungsstrom entspricht. Ist diese Spannung erreicht, so erfolgt eine Entladung bei fg in Form eines schwachen Flaschenfunkens. Nach diesem entladet sich dann der Strom-Ueberschuss in Form einer Lichthülle, wie früher. Wächst die bindende Oberfläche bei D , so wird endlich ein Punkt erreicht, bei welchem die gesammte durch den Oeffnungsstrom erzeugte Electricitätsmenge verbraucht wird, um D bis zur vollen Spannung, wie sie der grössten Schlagweite entspricht, zu laden. Dann ist der Inductionsfunken also vollkommen Flaschenfunken geworden. Bei noch tieferem Eintauchen verbreitet sich ein und dieselbe Electricitätsmenge auf immer grösserer Fläche. Die Spannung, also auch die Schlagweite muss abnehmen. Ist für diesen Fall der Abstand der Electroden zu gross, so entladet sich die Vorrichtung DE nach Verlauf des Oeffnungsstromes rückwärts durch die Inductionsrolle. Um also bei

fg Flaschenfunken von derselben Schlagweite, wie sie der ursprüngliche Inductionsfunken besitzt, zu erzielen, muss zwischen der Wirkungsfähigkeit des Inductors und der Vorrichtung *D* ein ganz bestimmtes Verhältniss bestehen, welches sich durch den Versuch ermitteln lässt. Für meinen Apparat betrug die in jenem Falle eingetauchte Glasfläche etwa 65,2 Quadrat-cmtrs. Ich glaube, dass die eben erläuterte Thatsache sich recht gut benutzen liesse, um unter Anwendung der nöthigen Cautelen vergleichende Versuche über die Intensität der Inductionsströme anzustellen.

Was nun die Eigenschaften des Flaschenfunkens betrifft, so bestätigen die Untersuchungen im Schlieren-Apparat, dass an Stelle der sehr verminderten Erhitzung im Schlagraume vermehrte Lichtentwicklung und mechanische Erschütterung in Form von Schall tritt.

Es findet ein ganz einfacher Umsatz in der vom Funken geleiteten Arbeit statt. Dies zeigt sich auch im übrigen Verhalten unzweideutig. Ein Kork wird, zwischen die Electroden gebracht, durch den Inductionsfunken fast augenblicklich verkohlt und entzündet. Der Flaschenfunken, lässt man ihn auch noch so oft überschlagen, bewirkt kaum Spuren von Verkohlung, während der Funken sich mit der Zeit einen Weg in die glatte Korkoberfläche förmlich einmeisselt. Berührt man den Kork mit der Hand, so fühlt man deutlich den Stoss eines jeden der krachenden Flaschenfunken. Die Mantelbildung und die aufsteigenden Luftschlieren habe ich auch für den Flaschenfunken bereits im Früheren beschrieben.

Einer höchst interessanten Erscheinung muss ich jedoch besonders gedenken, welche sich bei momentaner Beleuchtung geltend macht, und dies sind die den Schall vermittelnden Stosswellen in der umgebenden Luft. Dieselben sind beim Inductionsfunken zu schwach, um im Schlieren-Apparate bemerkt zu werden. Wendet man als Beleuchtungsflasche nur eine einzige Flasche mit 2 Fuss Belegung an, und bringt man den Abstand der Illuminatorkugeln auf etwa 0,4 bis 0,5 mmtrs., so zeigt der Flaschenfunken im Gesichtsfelde die in Fig. 5 Tafel IV dargestellte Erscheinung.

Der Funken erscheint, abgesehen von Mantel und Wölkchen, von concentrischen, sphäroidischen Gebilden *a b c* umgeben, welche ziemlich scharf begrenzt sind. Dieselben sind an den Rändern nie zerrissen oder ausgebaucht; sie nähern sich um so mehr der Kugelform, je grösser sie werden. In nächster Nähe des Funkens haben sie das Aussehen eines beiderseitig von Halbkugeln begränzten Cylinders. Bei raschem Gange des Interruptors machen sie fast den Eindruck von Seifenblasen, welche sich um den Funken bilden, um sofort wieder zu

verschwinden. Man glaubt stets mehrere, gewöhnlich 3 bis 4 gleichzeitig im Gesichtsfelde zu erblicken. Lässt man aber den Interuptor möglichst langsam arbeiten, so dass das Ohr die einzelnen Schläge deutlich unterscheidet, so sieht man, dass jeder Entladung nur ein einziges der oben beschriebenen Sphäroide entspricht, dass aber das Phänomen von Funken zu Funken sehr an Grösse und Ausbildung wechselt.

Viel deutlicher und stärker schattirt zeigt sich die Erscheinung, wenn man die Spitzen der Electroden umbiegt und hinter einander in der Richtung der optischen Achse, wie in Fig. 6 adjustirt. Aus zweifachem Grunde gewinnt hierbei die Erscheinung an Deutlichkeit. Zunächst fällt das blendende Funkenbild in einen Punkt zusammen, welcher zum grössten Theil von der vorderen Electrode verdeckt wird. Ferner verlaufen die Lichtstrahlen des Schlieren-Apparates parallel mit der grossen Achse der Sphäroide, werden also stärker abgelenkt werden müssen. Nunmehr erscheinen jene Sphäroide vollkommen kreisförmig und sehr stark schattirt, wie es in Fig. 6 möglichst naturgetreu wiedergegeben ist. Der Durchmesser schwankt zwischen 1 und 4 Zoll bei der oben angenommenen Zusammenstellung des Illuminators. Gibt man der Beleuchtungsflasche bis zu 4 Fuss Belegung, so sieht man die Sphäroide sich oft bis zu 7 Zoll Durchmesser ausbilden. Um der Grösseren alsdann ansichtig zu werden, muss der Funken selbstverständlich neben dem Gesichtsfelde überschlagen.

Es lässt sich nun durch Versuche leicht nachweisen, dass die Sphäroide um den Flaschenfunken in ihrem Wesen durchaus nichts mit dem früher besprochenen Funkenmantel gemein haben, dass sie nichts Anderes, als die vom Funken erzeugten Schwingungswellen in der umgebenden Luft sind.

Zunächst haben wir zu erörtern, weshalb die Wellensphäroide einen so wandelbaren Durchmesser zeigen. Wenn die Retardation zwischen Beobachtungs- und Beleuchtungsfunken stets dieselbe wäre, wie es der Theorie nach scheinen sollte, so müsste ja die von jedem Funken erzeugte Welle im Gesichtsfelde stets an ein und derselben Stelle erscheinen. In der That jedoch ist die Verzögerung zwischen jenen beiden Funken eine sehr veränderliche. Blicken wir noch einmal auf Fig. 1 Tafel III, so werden wir erkennen, dass die Schlagweite zwischen den Kugeln *a b* sich von Funken zu Funken verändert. Die mechanisch mitfortgerissenen Metalltheilchen häufen sich an den anfänglich glatten Kugelflächen zu deutlichen Hervorragungen an. Dieselben machen sich bei der an und für sich kleinen Schlagweite immerhin bemerklich. Ja es kommt sogar zuweilen vor, dass die Kugeln bei

sehr kleiner Schlagweite förmlich zusammenbacken, so dass man sie auseinandernehmen und reinigen muss. Ein wesentliches Moment zu Gunsten der ungleichen Verzögerung des Beleuchtungsfunkens ist ferner das Residuum in der Flasche *B*. Wie man erkennt, steht die innere Belegung nur mit der Leitung *b c d e v f* in dauernder Verbindung, ist also nach beiden Seiten isolirt. Es kann sich also in der Beleuchtungsflasche ein Residuum bis zur nächsten Ladung erhalten. Hat nun durch die stete Veränderung in der Schlagweite zufällig einmal eine ungewöhnlich starke Verzögerung statt gehabt, so bleibt auch in *B* ein ungewöhnlich grosses Residuum. Aus diesem Grunde muss die folgende Entladung um so früher eintreten, also wird auch die betreffende Welle im Beleuchtungsmomente viel kleiner, als die vorausgegangene sein. Endlich spielt auch die Lufterwärmung zwischen *ab* eine Rolle. Dieselbe ist bei der veränderlichen Schlagweite nicht constant. Ist bei grösserer Schlagweite eine ungewöhnliche Erwärmung eingetreten, so hat dieselbe bis zur folgenden Ladung nicht Zeit, sich nach den Seiten hin auszugleichen. Die folgende Entladung findet weniger Widerstand, also auch verminderte Retardation. Wie man sieht, summiren sich obige drei Factoren in ihrer Wirkung, wodurch also in der That das Zeitintervall zwischen dem Beobachtungs- und Beleuchtungsfunken sehr veränderlich ausfallen muss. Aus den oben mitgetheilten Dimensionen für die Wellensphäroide ergibt sich, dass die Verzögerung bei einer zweifüssigen Flasche und 0,4 *mmtr.* Schlagweite im Illuminator zwischen den Zahlen 0,000308 und 0,000077 Secunde schwankt, die Schallgeschwindigkeit zu 341 *mtrs.* angenommen.

Man kann sich natürlich sehr leicht davon überzeugen, dass jedes einzelne Wellensphäroid nur durch den zugehörigen Illuminatorfunken sichtbar gemacht wird. Entfernt man die Beleuchtungsflasche aus der Anordnung Fig. 1 Tafel III, so beleuchtet der beobachtete Funken sich selbst. (Siehe oben.) Alsdann verschwindet die Erscheinung vollständig, ein Beweis, dass die Fortpflanzung jener Wellen in keinem Vergleich steht mit dem Anwachsen des früher besprochenen Funkenmantels.

Durch sehr grosse Verzögerung gelang es mir ebenfalls, die Sphäroide zum Verschwinden zu bringen. Dies geschah bei Einschaltung des schon besprochenen 18füssigen Condensators in den Illuminator. Während der hierdurch sehr gesteigerten Verzögerungsdauer hatten sich also die Wellen so sehr um den centralen Funken ausgedehnt, dass sie ausserhalb des Gesichtsfeldes lagen. Zugleich hatten sie aber so sehr an Intensität verloren, dass sie auch dann nicht sicht-

bar wurden, als ich den Funken selbst in beliebige Entfernung aus dem Gesichtsfelde brachte.

Obgleich für die in Rede stehende Erscheinung keine andere Erklärung, als die bisher festgehaltene, übrig bleibt, so will ich doch noch einige Versuche anführen, welche mit jener Erklärung in Einklang stehen.

Besitzen die sphäroidischen Wellen die grosse Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, so dürfen sich dieselben durch schwache Luftströme nicht, wie der Funkenmantel, fortblasen lassen.

Befestigt man unter den in der Richtung der optischen Achse überschlagenden Funken *a* Fig. 7 Tafel IV ein weites Glasrohr, vermittle dessen ein constanter Luftstrom durch den Schlagraum geblasen wird, so bemerkt man nur bei sehr starker Strömung eine schwache Ausbauchung an der oberen Seite der etwa zollgrossen Wellen. An der unteren Seite der Wellenfläche zeigt sich jedoch eine deutlich sichtbare Veränderung, welche von dem Luftstrome ganz unabhängig ist. Zwischen den Punkten *mn* und dem Rohr *bc* erscheint die Welle stärker gekrümmt, und zwar um die Punkte *de* als Krümmungsradien. Es entspricht dies offenbar den Fortpflanzungs-Gesetzen einer von *a* ausgehenden Schallwelle.

Eine analoge Veränderung in der Ausbildung der Welle beobachtet man noch deutlicher bei dem Versuch Fig. 10. Man lege quer über die Electroden, deren Spitzen wieder hinter einander in der optischen Axe justirt werden, einen langen Glasstreifen vom Querschnitt *a*. Der Streifen darf nicht zu leicht sein, weil er sonst durch den Funken weggeschleudert wird. Man sieht jetzt den Funkenmantel *b* in axialer Richtung. Nicht allein aus diesem Grunde erscheint er sehr deutlich, sondern mehr noch, weil er sich nur nach einer Seite hin ausbilden kann. Sehr deutlich sieht man ferner, wie die Wellen sich um die feste Platte mit entsprechender Veränderung des Krümmungsradius fortpflanzen.

Die Wellen müssen sich, falls es Schallwellen sind, in dünnerer oder wärmerer Luft mit grösserer Geschwindigkeit fortpflanzen. Dass dies in der That der Fall ist, lehrt der folgende, einfache Versuch:

Bringt man zwischen die Electroden eine Lichtflamme, so gewinnt der Flaschenfunken sehr an Schlagweite, ohne dabei sein fadenförmiges Aussehen zu verändern. Er unterscheidet sich hierdurch wesentlich vom Inductionsfunken. Stellt man nun die Flamme so, dass sie nur die eine Electrode umhüllt, während die andere sich ganz ausserhalb des äusseren Flammenmantels befindet, so wird im Allgemeinen beim Uebergange der Funken die Flamme stark disturbirt

und seitlich auseinander gesprengt. Bei langsamem Gange des Interruptors kann man jedoch sehr häufig das um den Funken gebildete Wellensphäroid in den Flammenmantel hinein verfolgen. Es zeigt alsdann die Gestalt Fig. 8. Man hat auf diese Weise grössere Fortpflanzungs-Geschwindigkeit in der erhitzten Luftsäule und Brechung der Wellenfläche bei p und q in einem Bilde vereinigt.

Zum Ueberfluss führte ich noch den folgenden Versuch aus, um jeden Vergleich der sphäroidischen Gebilde mit dem Funkenmantel unmöglich zu machen. Ich liess den Funken zwischen zwei parallelen, möglichst schlierenfreien Glasplatten überspringen, zwischen welchen die Electroden wie in Fig. 9 angebracht waren. Die Platten konnten bis auf die Dicke der Electroden (1 *mmtr.*) einander genähert und beliebig von einander entfernt werden. Die Vorrichtung wurde in den Schlieren-Apparat eingeschaltet. Liess man den Inductionsfunken zwischen den Electroden übergehen, so entwickelte sich, wie gewöhnlich, der Mantel, falls der Abstand der Glasflächen 3 bis 4 *mmtrs.* betrug. Nähert man die Glasplatten, so kann man den Mantel thatsächlich plattdrücken. Er wird unregelmässig, indem er sich ausdehnt, und erscheint bei nächster Stellung der Glasflächen als ein formloser Ballen Fig. 9 um den Funken. Verwandelt man nun den Inductions- in den Flaschenfunken, so zeichnet sich das Wellenphänomen in unveränderter Gestalt und Grösse, grade als ob die Platten gar nicht vorhanden wären, nur wird die Schattirung um so schwächer je näher die Platten gestellt werden. Es pflanzt sich somit der Impuls, welcher das Phänomen veranlasst, in der zwischen den Platten eingeschlossenen Luftscheibe mit derselben Geschwindigkeit, als in freier Luft fort. Dies spricht abermals unzweideutig für die Wellennatur. Dass die Zeichnung bei sehr kleinem Abstände der Platten schwächer schattirt ist, bedarf keiner Erläuterung.

Der hübscheste Versuch, welcher sich mit den Wellensphäroiden ausführen lässt, ist ihre Reflexion. Klemmt man zwischen die isolirten Korke ab Fig. 11, welche die Platinelectroden tragen, eine blanke Glastafel xy ein, so dass sie etwa $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{4}$ Zoll von dem axialen Funken c absteht, so zeigt sich neben dem ursprünglichen Wellensystem noch ein zweites, welches in Form von Kreissegmenten über der Glastafel ausgespannt ist. Dieses zweite System hat ganz augenscheinlich ein imaginäres Centrum c' in gleichem Abstände des Funken c jenseits der reflectirenden Fläche. Ich glaube, dass das Grundgesetz über die Reflexion der Wellenbewegungen in der That kaum einer schöneren Verification bedarf. Wird die Platte xy über dem

Funken angebracht, so wird die Erscheinung durch die aufsteigende erhitzte Luft in der regelmässigen Ausbildung gestört.

Noch eine zweite interessante Bemerkung macht man bei diesem Versuch. Bringt man das Ohr in eine solche Lage, dass es sich in der Entfernung von etwa 1 Fuss senkrecht über dem Funken *c* und der reflectirenden Platte befindet, so bemerkt man neben der verstärkten Intensität des Schalles auch eine unzweideutige Veränderung der Klangfärbung, wenn von einer solchen bei den explosiven Entladungen die Rede sein darf. An Stelle des scharfen Knalles, wie er dem freien Flaschenfunken entspricht, tritt ein eigenthümliches plattes Geräusch, welches vom Gehörorgan wesentlich anders empfunden wird. Dieses ist ohne Zweifel der Interferenzwirkung zwischen directer und reflectirter Welle zuzuschreiben, ein Beweis, dass auch bei vereinzelt Schallerregungen die Eigenthümlichkeit der Empfindung, welche wir Klang nennen, in der Gestalt der Wellencurve zu suchen ist.

Schlussbemerkungen.

Durch die in Obigem vorläufig mitgetheilten Versuche glaube ich die Wellennatur der sphäroidischen Erscheinungen um den Funken der Leidener Flasche bereits hinlänglich erwiesen zu haben. Hoffentlich wird es mit Hülfe des Schlieren-Apparates ebenso leicht gelingen, die Interferenzphänomene u. s. w. mit derselben Sicherheit zur unmittelbaren Anschauung zu bringen. Nachträglich mache ich auf die grosse Unbequemlichkeit aufmerksam, welche ein zu kleines Gesichtsfeld bei allen meinen Versuchen veranlasste. Es ist in der That nichts lästiger, als eine Erscheinung nur stückweise beobachten zu können, wie es bei meinen meisten Versuchen leider der Fall war. Eine grosse Oeffnung des Kopfes ist daher nicht dringend genug zu empfehlen.

Die Wellensphäroide um den Flaschenfunken lassen nicht eher eine genaue Messung ihrer Dimensionen zu, bis die vielbesprochene Verzögerung in der Entladung auf ein ganz constantes Maass gebracht werden kann. Dies wird sich durch Anwendung von Platinkugeln im Illuminator, verbunden mit grösserer Schlagweite, höchst wahrscheinlich erreichen lassen. Ich bedaure in dieser Beziehung, dass ich keinen Inductor von grösserer Schlagweite, als den früher besprochenen, zu meinen Versuchen benutzen konnte. Die Verzögerung lässt sich auch bei kleinerer Schlagweite dadurch constanter machen, dass man den Illuminatorfunken unter schlecht leitenden Flüssigkeiten überschlagen lässt. Die hierüber bereits angestellten Versuche scheinen ein vollkommenes Gelingen zu versprechen. Obgleich die Sphäroide nicht absolut scharf begränzt erscheinen, so kann man sich doch Anhaltspunkte für eine exacte Messung verschaffen, wenn nur obige Voraussetzung erfüllt ist. Stellt man nämlich unter sonst gleich bleibenden Umständen das Gesichtsfeld ganz dunkel ein, so verschwindet die Schattirung der Wellen. Nur allein der geometrische Ort der grössten Verdichtung zeichnet sich als eine äusserst zarte, die Gestalt der Welle characterisirende Linie. Sollte es also gelingen, Wellen von constanten, daher messbaren Dimensionen zu erhalten, so wäre damit ein Mittel gegeben, manche Probleme der Akustik auf dem directen Wege der Beobachtung zu lösen.

Als Zusatz sei noch erwähnt, dass alle Versuche, die Schlierenphänomene objectiv darzustellen, bis jetzt nur ungenügende Resultate gegeben haben. Im Halbschatten (siehe Einleitung) konnte ich zwar einige Erscheinungen sichtbar machen. Allein die Bilder waren verwaschen und entsprachen meist der wahren Gestalt der Schlieren nicht. Ich hebe es als einen besonderen Vorzug meiner Methode hervor, dass man eben wahre Gestalt und Grösse des Beobachtungsobjectes erkennt.

Unter den in vorliegender Abhandlung aufgeführten Versuchen eignen sich diejenigen über die Wellensphäroide wegen ihrer Zierlichkeit und überraschenden Deutlichkeit am besten zu Demonstrationen und Vorlesungszwecken.

Ich schliesse meine Mittheilungen mit den Beobachtungen am electricischen Funken, indem andere Versuchsreihen, auf welche mich der Schlieren-Apparat geführt hat, weil dieselben noch nicht zum Abschluss gelangt sind, späteren Veröffentlichungen vorbehalten bleiben müssen.

I n h a l t.

	Seite
Princip der Beobachtungs-Methode	2
Specielle Beschreibung des Apparates	8
Bemerkungen über den Gebrauch und die Adjustirung	13
Schlieren in Gläsern	16
Beobachtungen mittels des Schlieren-Apparates	18
Veränderung durchsichtiger Körper durch Temperatur und Druck	19
Diffusionsbewegungen	21
Untersuchung der Flammen	23
Beugungsphänomene	26
Sichtbarmachung der Schallwellen	27
Beobachtungen über den electricischen Funken	29
Der Inductionsfunken	35
Der Flaschenfunken	42
Schlussbemerkungen	49

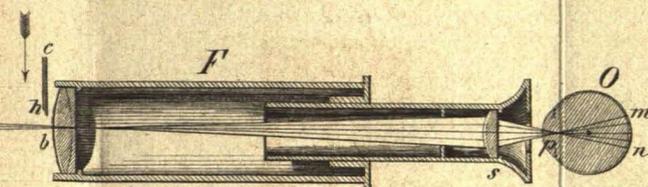
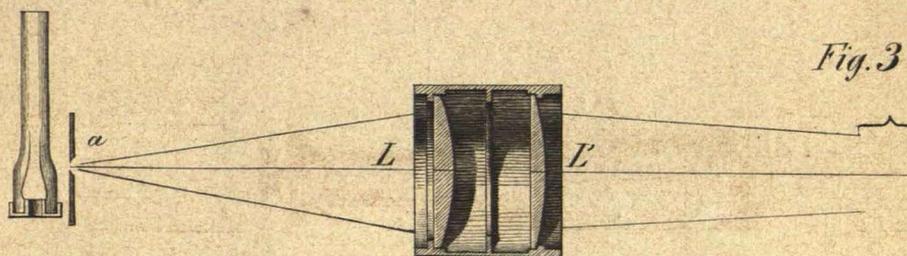
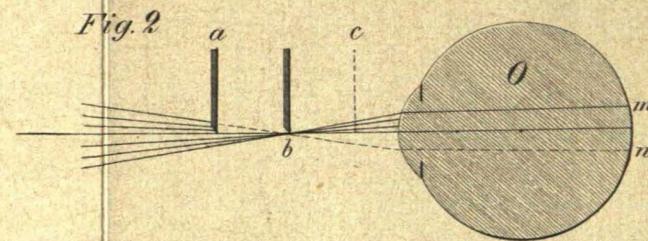
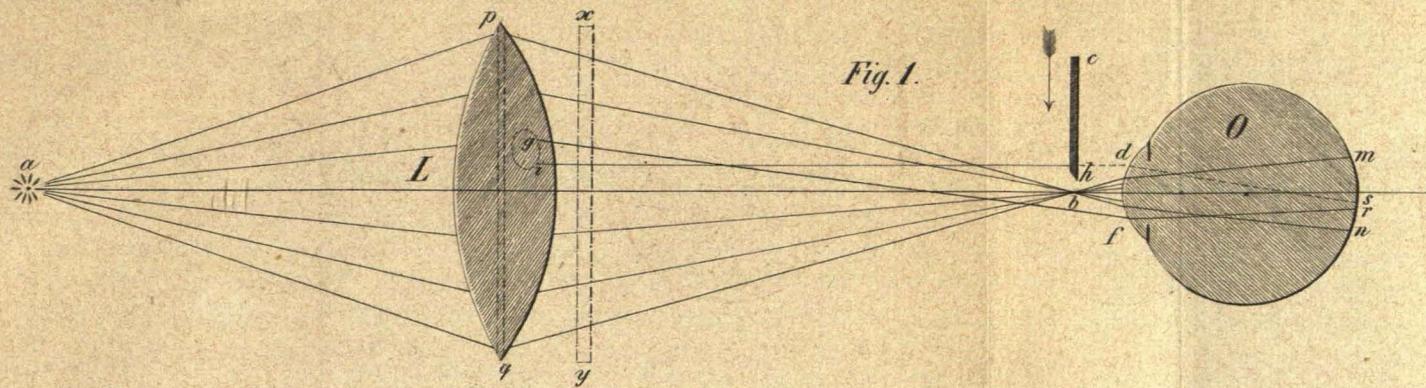
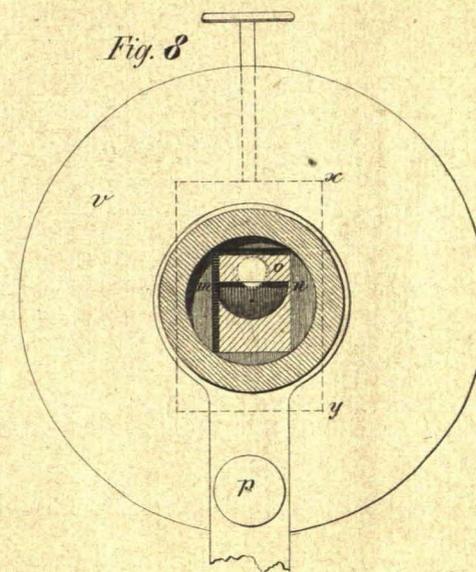
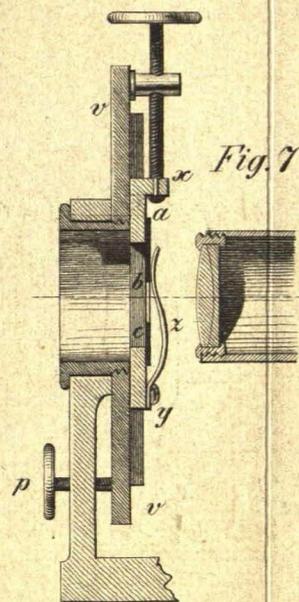
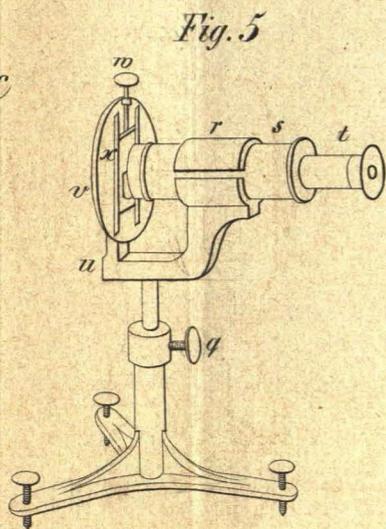
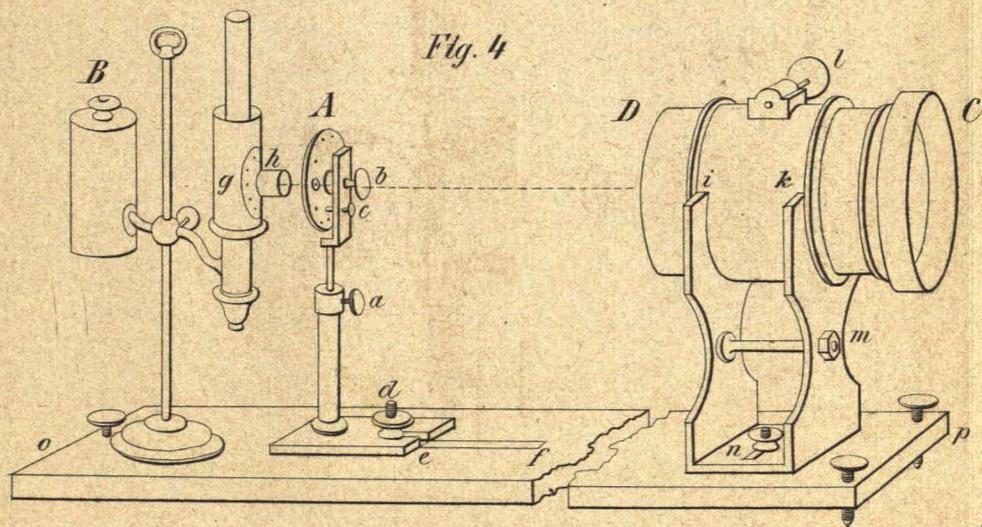
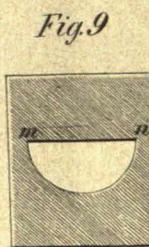


Fig. 6



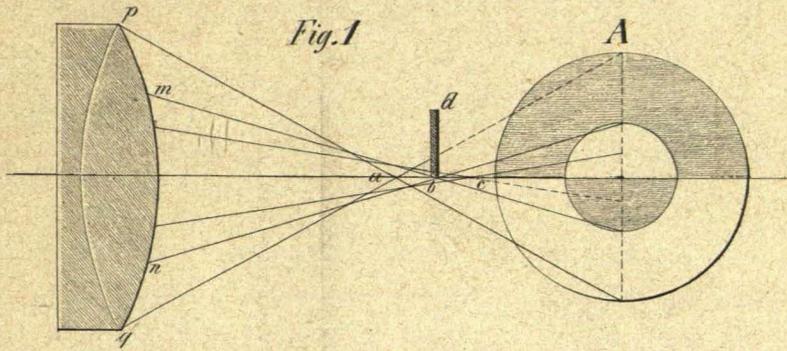


Fig. 1

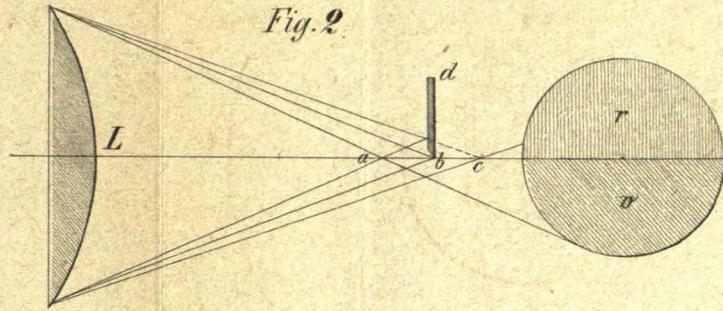


Fig. 2

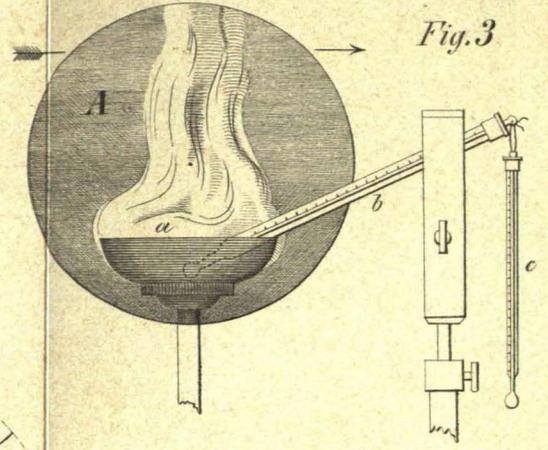


Fig. 3

Fig. 4

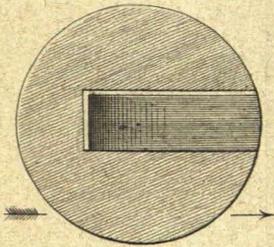


Fig. 5

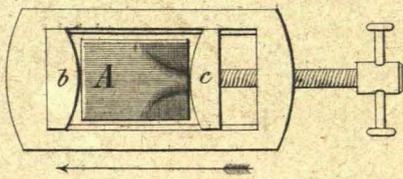


Fig. 6

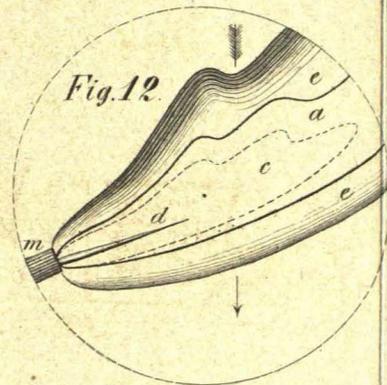
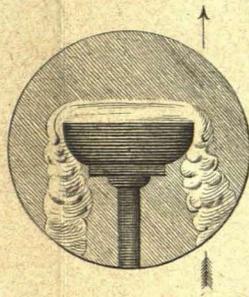


Fig. 12

Fig. 14

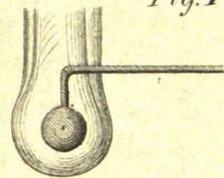


Fig. 7.

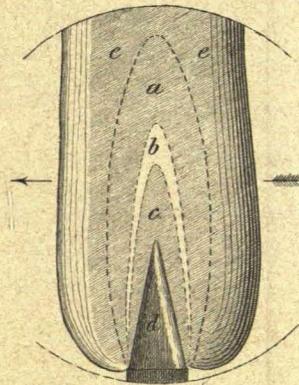


Fig. 8.

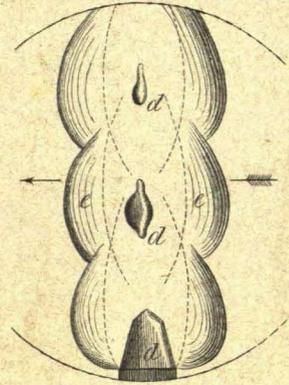


Fig. 9

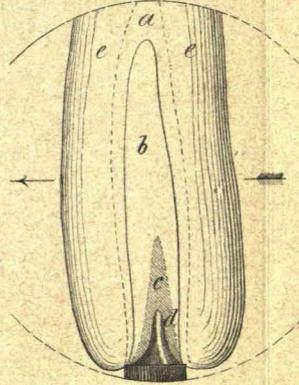


Fig. 10

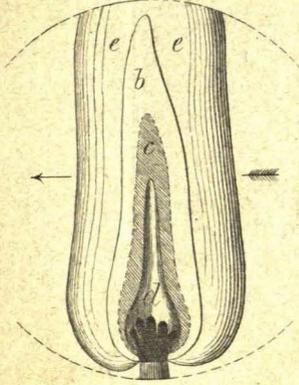


Fig. 11.

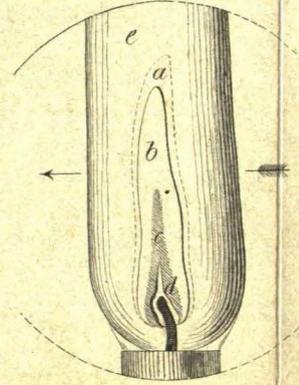
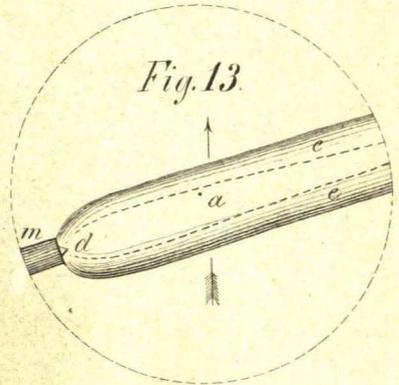
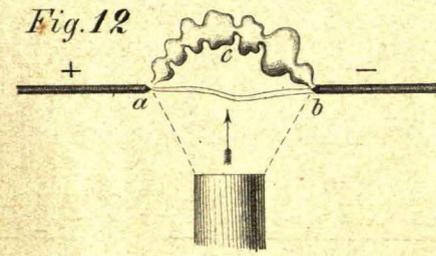
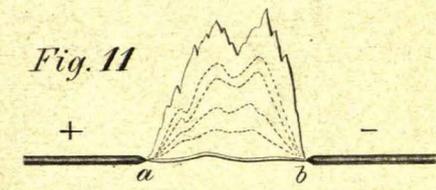
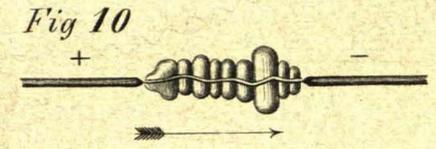
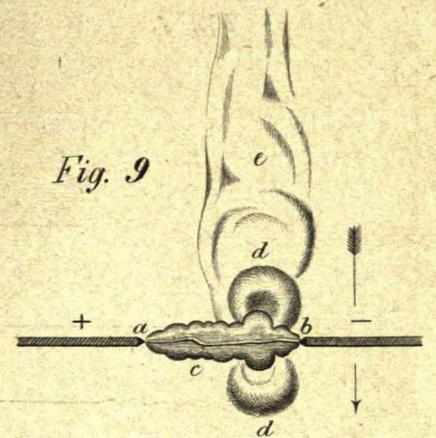
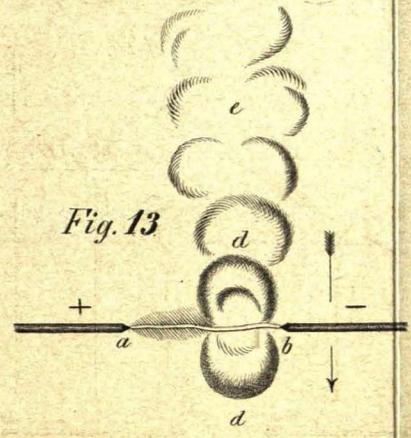
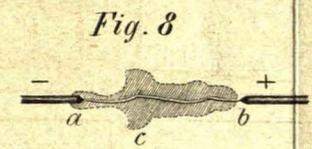
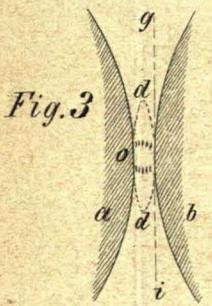
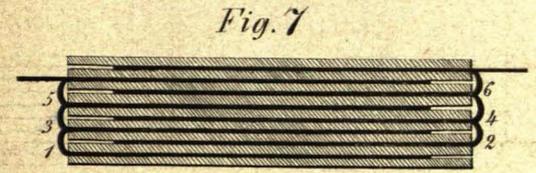
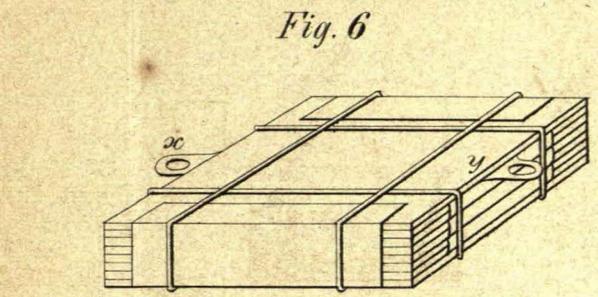
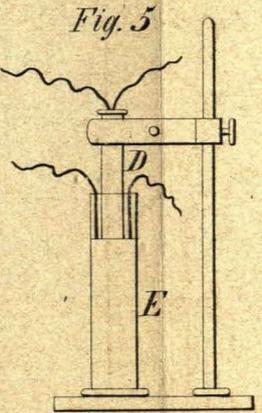
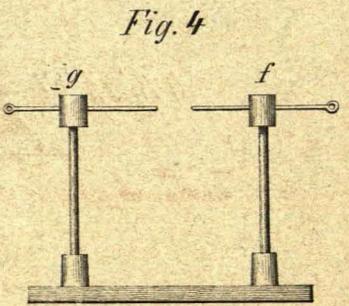
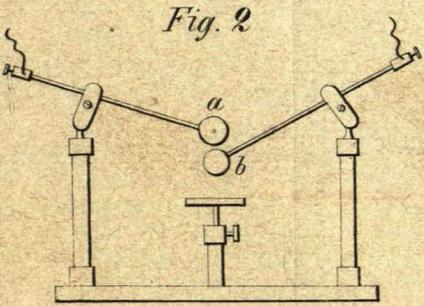
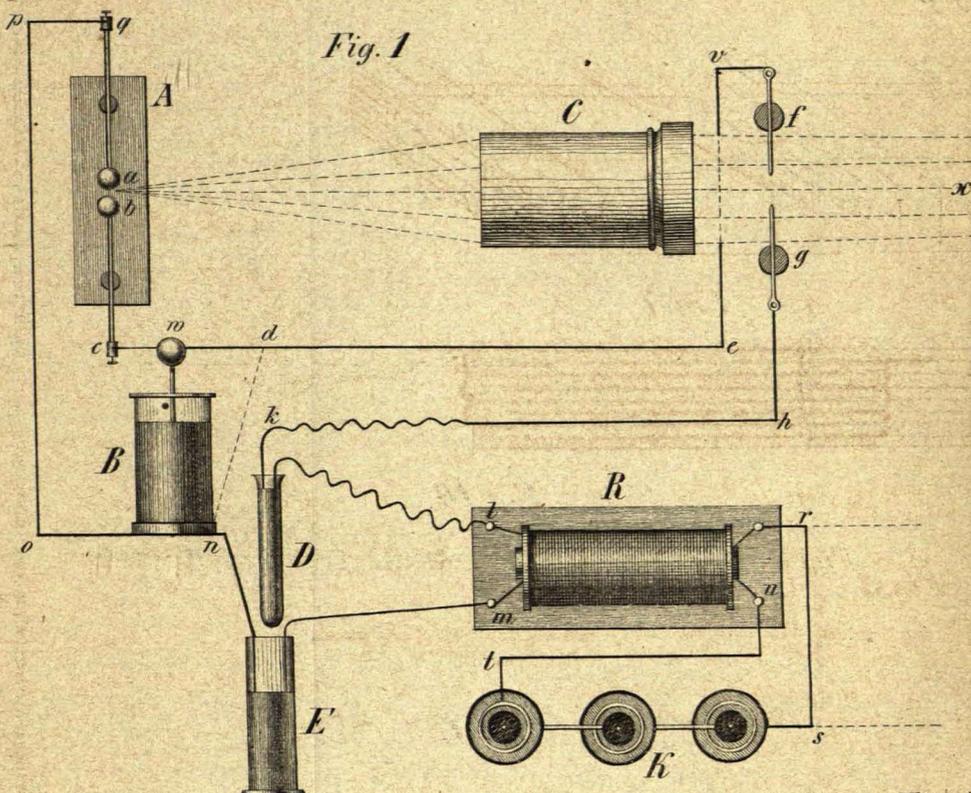


Fig. 13.





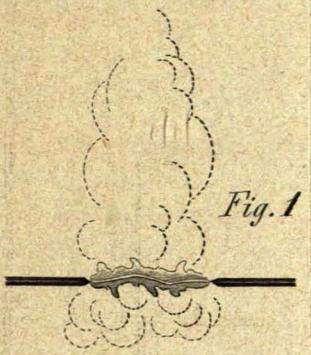


Fig. 1

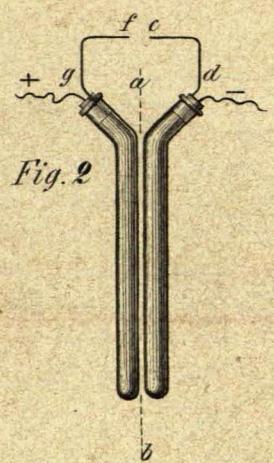


Fig. 2

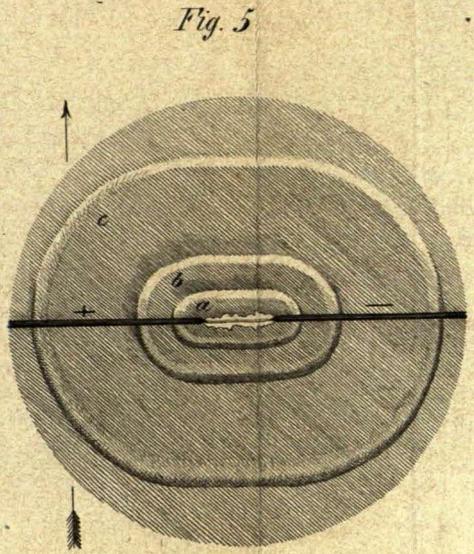


Fig. 5

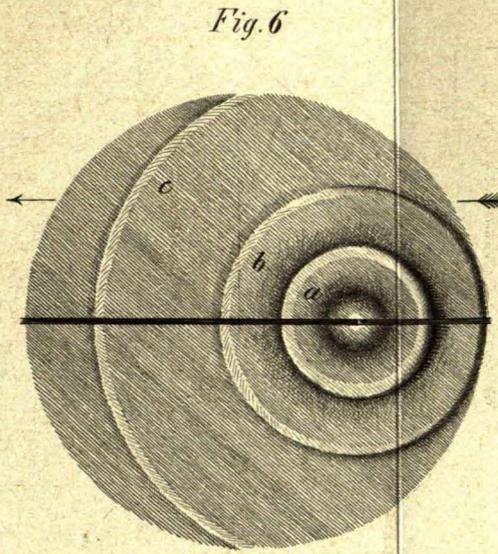


Fig. 6

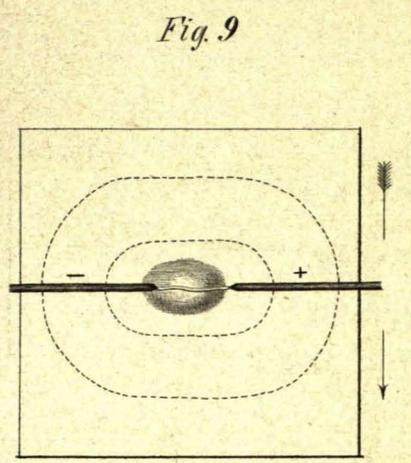


Fig. 9

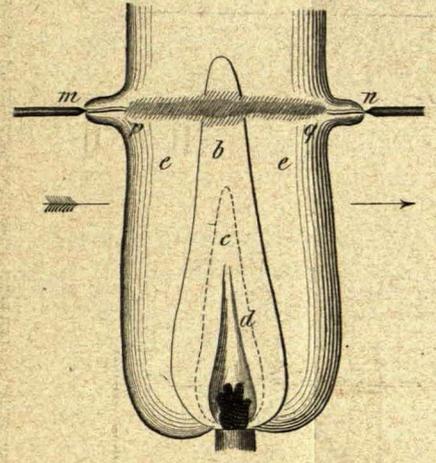


Fig. 3

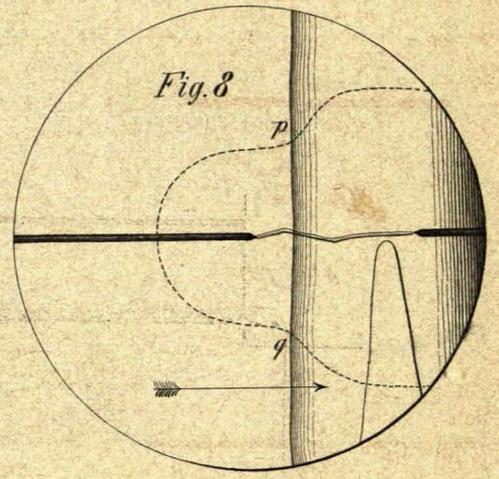


Fig. 8

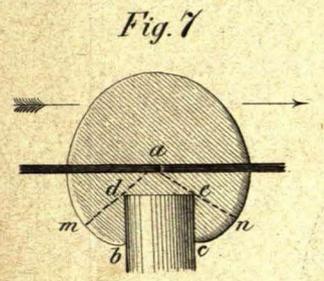


Fig. 7

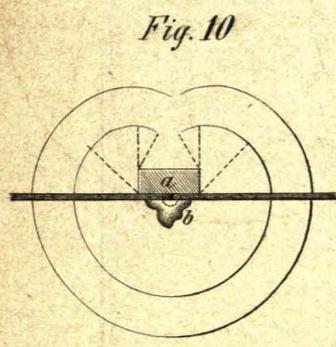


Fig. 10

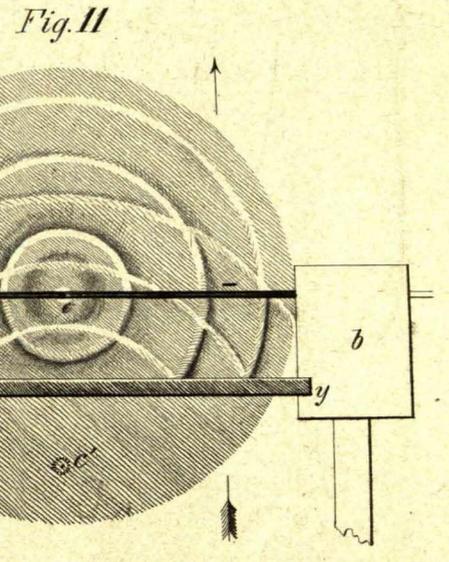


Fig. 11

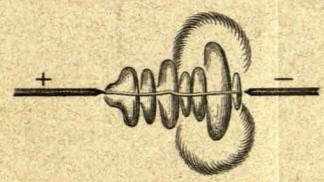


Fig. 4