

I. *Ueber die Abweichung der Geschosse, und:
Ueber eine auffallende Erscheinung bei rotirenden
Körpern; von G. Magnus.*

(Aus d. Abhandl. d. K. Akad. zu Berlin f. 1852.)

I. Ueber die Abweichung kugelförmiger Geschosse.

Es ist eine jetzt allgemein bekannte Erfahrung, daß bei dem Abschieseln einer Kugel, deren Schwerpunkt nicht mit ihrem Mittelpunkt zusammenfällt, eine Abweichung stattfindet, und zwar in der Art, daß wenn der Schwerpunkt im Rohre auf der rechten Seite lag, auch die Abweichung nach rechts stattfindet, und ebenso wenn er auf der linken Seite lag, nach links, wenn er aber oberhalb der Axe sich befand, die Schußweite größer, und wenn er unter der Axe lag, die Schußweite verkürzt ist. Diese Abweichung kann bisweilen sehr erheblich werden, so daß sie ein Sechstheil und in einzelnen Fällen sogar ein Viertel von der Schußweite, also mehrere hundert Schritte beträgt. Die Artillerie hat diese Erfahrung bereits benutzt, und seitdem die Lage des Schwerpunkts beim Laden berücksichtigt wird, ist es möglich das Ziel weit sicherer zu treffen als früher.

Eine Erklärung dieser Abweichungen ist indess bis jetzt noch nicht gelungen. Man hat nur ermittelt, indem man mit solchen excentrischen Kugeln durch Wände geschossen hat, die in geringen Entfernungen vor dem Geschütze aufgestellt waren, daß die seitliche Abweichung in einem größeren Verhältniß wächst als die Entfernung. Es kann dieselbe daher nicht durch eine Kraft hervorgebracht

seyn, die nur während der Bewegung im Rohre gewirkt hat, etwa durch eine Reibung gegen die inneren Wände oder durch ein Anschlagen an diese oder an den vorderen Rand des Geschützes, sondern es muß die ablenkende Kraft während der ganzen Zeit der Bewegung wirksam gewesen seyn.

Robins, der zuerst eine Erklärung dieser Abweichung in seinen *Principles of Gunnery* versucht hat, glaubte, daß die ablenkende Kraft durch die Umdrehung des Geschosses erzeugt werde, und gegenwärtig nimmt man dies allgemein an.

Allein wiewohl man seit Robins sich sehr vielfältig bemüht hat zu erklären, wie durch eine solche Rotation eine Abweichung des Geschosses eintreten könne, so hat dies doch selbst den Bemühungen von Euler und Poisson nicht gelingen wollen. Besonders hat der Letztere den Gegenstand ausführlich in mehreren Abhandlungen behandelt, welche er der Pariser Academie vorgelegt hat, und die in dem *Journal de l'Ecole Polytechnique* abgedruckt, so wie auch als besonderes Werk unter dem Titel: *Recherches sur le mouvement des projectiles dans l'air* erschienen sind. Er betrachtet darin zuerst den Einfluß, welchen die Umdrehung der Erde auf die Bahn des Geschosses ausübt, sodann den, welchen die Reibung der Luft sowohl auf die translatorische als auf die rotirende Bewegung hat, und endlich den, welchen die unvollkommene Sphaericität, so wie der Mangel an Homogenität hervorbringen. Aus seinen Rechnungen folgert er, daß zwar durch die Rotation des Geschosses eine Abweichung stattfindet, jedoch eine so geringe, daß die beobachteten Ablenkungen nicht von einer Reibung der Oberfläche des Geschosses gegen die anliegende Luftschicht herrühren können¹⁾.

Seitdem haben mannigfache Controversen über die Erklärung dieser Abweichung stattgefunden, auf die einzugehen aufser dem Zwecke dieses Aufsatzes liegt. Wie we-

1) *Recherches sur le mouvement des projectiles* p. 77.

nig aber die bisher aufgestellten Erklärungen genügen, spricht der Württembergische Major der Artillerie, Herr v. Heim, in seinen „*Beiträgen zur Ballistik in besonderer Beziehung auf die Umdrehung der Artilleriegeschosse*“ ganz bestimmt aus, indem er daselbst p. 13. sagt: „Sonach ist die Aufgabe eine den Anforderungen der Wissenschaft entsprechende Erklärung der erwähnten paradoxen Erscheinungen zu geben, bis jetzt noch keinesweges gelöst;“ und dann: „Dieses nachzuweisen und den Standpunkt der Frage festzustellen, zu zeigen, dafs auf dem bisher betretenen Wege das Ziel nicht erreichbar ist, und zugleich die Aufmerksamkeit der Männer von Fach auf diesen, nicht nur für die Artillerie-Wissenschaft, sondern für die gesammte Naturlehre sehr wichtigen Gegenstand zu lenken“ als den hauptsächlichlichen Zweck seines Werkes bezeichnet.

Durch eine Untersuchung, die ich früher in Bezug auf die Bewegung von Flüssigkeiten angestellt habe, bin ich auf die, von den bisher aufgestellten wesentlich abweichende, aber, wie mir scheint, richtige Erklärung dieser interessanten Erscheinung geführt worden.

Zur Begründung derselben schien es wünschenswerth, durch Versuche im Kleinen den Vorgang näher zu erforschen, und namentlich den Druck zu untersuchen, welchen die Luft an den verschiedenen Stellen des Geschosses ausübt.

Bei diesen Versuchen bin ich davon ausgegangen, dafs wenn eine Kugel sich durch die Luft bewegt, alle Druckverhältnisse ganz auf dieselbe Weise stattfinden, als wenn die Kugel an ihrer Stelle bleibt und die Luft sich bewegt, vorausgesetzt, dafs die Geschwindigkeit in beiden Fällen dieselbe ist. Man kann deshalb den Vorgang, welcher während der Bewegung eines Geschosses durch die Luft stattfindet, beobachten, wenn man das Geschofs an unveränderter Stelle läfst und die Luft gegen dasselbe mit der Geschwindigkeit bewegt, welche das Geschofs gehabt haben würde, und zwar ist die Beobachtung der Druckver-

hältnisse auf diese Weise möglich sowohl für das rotirende als für das nicht rotirende Geschofs.

Betrachtet man zunächst was vorgeht, wenn die Luft gegen eine an ihrer Stelle verharrende, jedoch nicht rotirende Kugel sich bewegt, so ist einleuchtend, dafs rund um den Durchmesser derselben, welcher der Richtung des Luftstroms parallel ist, die Bewegung der Luft auf gleiche Weise stattfindet. Anders verhält es sich aber, wenn die Kugel rotirt.

Läfst man nämlich einen Körper von möglichst vollkommener Kugelgestalt um eine feste Axe in ruhender Luft rotiren, so wird dieser Luft eine rotirende Bewegung mitgetheilt, die besonders stark ist, wenn die Kugel excentrisch rotirt, aber auch noch sehr deutlich beobachtet wird, wenn der Mittelpunkt in der Drehungsaxe liegt. Diese Bewegung der Luft ist rund um die Drehungsaxe dieselbe, so dafs, wenn auch der Mittelpunkt der Kugel nicht in der Drehungsaxe liegt, und man sich die Oberfläche vorstellt, welche die rotirende Kugel einhüllt, in allen Punkten eines Parallelkreises dieser Oberfläche die Kraft, mit welcher die Luft bewegt wird, dieselbe ist.

Betrachtet man nun die vereinte Wirkung der Rotation und der translatorischen Bewegung, so bewegt sich die Luft, relativ zur Kugel, auf der Seite, auf welcher die Drehung von vorn nach hinten stattfindet, durch beide, die Fortschreitung und die Rotation, in demselben Sinne. Auf der gegenüberliegenden Seite aber, wo die Drehung der Kugel von hinten nach vorn geschieht, bewegt sich die Luft in Bezug auf die Kugel, durch die Rotation im entgegengesetzten Sinne, als durch die translatorische Bewegung.

Hieraus ergibt sich, dafs auf der Seite, auf welcher beide Wirkungen im gleichen Sinne stattfinden, die Luft sich mit gröfserer Geschwindigkeit bewegt als auf der andern. Da nun durch diese Bewegung der Luft, in Folge der Centrifugalkraft, ein Druck normal gegen die Kugeloberfläche entsteht, und dieser um so gröfser ist, je gröfser die

Kraft ist, mit welcher die Luft sich bewegt, so könnte man glauben, daß die Seite des Geschosses, welche sich von vorn nach hinten dreht, einen stärkeren Druck gegen den Mittelpunkt erfahre, als die andere, welche sich von hinten nach vorn dreht, und daß deshalb die Abweichung des Geschosses nach dieser letzteren Seite stattfinden müsse. Indessen lehrt die Erfahrung, daß sie nach der Seite erfolgt, auf welcher die Kugel sich von vorn nach hinten dreht.

Deshalb war es nothwendig, auf experimentellem Wege den vorhandenen Druck zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine Kugel um eine feste Axe in Rotation gesetzt, und ein Luftstrom gegen sie gerichtet. Weil sich aber die Beobachtungen an einem Cylinder mit mehr Sicherheit anstellen ließen, so wurde später die Kugel durch einen Cylinder ersetzt. Mittelst einer einfachen Vorrichtung konnte man diesen Cylinder entweder so befestigen, daß seine Axe mit der Rotationsaxe möglichst zusammenfiel, und ihn auf diese Weise concentrisch rotiren lassen, oder ihm durch eine kleine Verschiebung eine excentrische Rotation ertheilen.

Der Luftstrom, welcher senkrecht gegen die Axe des Cylinders gerichtet wurde, hatte zwar in der Höhe eine viel geringere Ausdehnung als der rotirende Cylinder, doch war er von solcher Breite, daß selbst, wenn der Cylinder mit der größten Excentricität rotirte, er sich doch stets innerhalb des Stromes befand. Außerdem war dafür gesorgt, daß in dieser ganzen Breite die Bewegung der Luft dieselbe war. Zur Erzeugung des Luftstromes wurde gewöhnlich ein kleines Centrifugalgebläse benutzt, das in Fig. 1. Tafel I. abgebildet ist. In der Trommel desselben *F* (welche 6 Zoll Durchmesser hatte), wurde mittelst des Schwungrades *E* eine Welle bewegt, an der sechs schaufelförmige Windflügel befestigt waren, durch welche in der ganzen Breite der Trommel (welche 5 Zoll betrug) die Luft gleichmäÙig bewegt, und aus der ebenso breiten Oeffnung *mn* hervorgetrieben wurde.

Kleine Windfahnen, die sehr beweglich waren, dienten dazu die Veränderungen des Drucks anzuzeigen, welche während der Rotation des Cylinders in dem Luftstrome stattfanden. Es wurden zwei solche a und b Fig. 1. Tafel I. zu beiden Seiten des Cylinders so aufgestellt, daß ihre Drehungspunkte in gleicher Entfernung von der Oeffnung mn und in gleichem Abstände von der Ebene waren, die durch die Drehungsaxe des Cylinders und durch die Mitte des Luftstroms geht. Wurde der Cylinder nicht gedreht, so nahmen beide Fahnen die Richtung des Luftstroms an. Sobald der Cylinder aber zu rotiren begann, so wandte sich auf der Seite, wo derselbe sich in gleicher Richtung mit dem Luftstrom bewegte, die Fahne dem Cylinder zu, während die auf der andern, wo die Bewegung des Cylinders und des Luftstroms in entgegengesetzter Richtung stattfanden, abgewandt wurde. Es war folglich auf jener Seite ein geringerer, auf dieser ein größerer Luftdruck vorhanden als im Zustand der Ruhe.

Diese Unterschiede im Drucke der Luft zeigten sich am stärksten in der Nähe der Stelle, wo die Richtung des Stromes Tangente des Cylinders war.

Bei sehr großer Geschwindigkeit der ankommenden Luft im Verhältniß zu der durch die Rotation des Cylinders erzeugten, wurden die Windfahnen nur sehr wenig von der Richtung abgelenkt, welche sie, bevor der Cylinder rotirte, durch den ankommenden Luftstrom angenommen hatten. War hingegen die Bewegung, welche die Luft durch die Rotation erhielt, nicht viel geringer als die in dem Strom vorhandene, so wurde die Fahne auf der Seite, auf welcher beide Bewegungen in demselben Sinne stattfanden, sehr stark gegen den Cylinder bewegt, und dann wurde auch auf der andern Seite die Fahne stark fortgedrückt.

Ich wende mich nun zu der Erklärung dieser Erscheinungen. Es stehen dieselben im nächsten Zusammenhange mit denen, welche in einer Abhandlung „*Ueber die Bewe-*

gung der Flüssigkeiten“ von mir beschrieben und erklärt worden sind ¹⁾).

Wenn nämlich eine Flüssigkeit in die gleichartige Masse mit einer gewissen Geschwindigkeit durch eine Oeffnung einströmt, so ist der Druck, welcher senkrecht gegen die Richtung stattfindet, nach welcher die einströmende Masse sich bewegt, geringer als der, welcher an dieser Stelle im Zustande der Ruhe vorhanden seyn würde.

Man kann sich am leichtesten von dieser Verminderung des Drucks überzeugen, indem man aus einer Röhre Luft hervorbläst, und neben der Ausströmungsöffnung eine Lichtflamme bringt. Sobald die Geschwindigkeit der Luft groß genug ist, sieht man die Flamme sich gegen den Luftstrom bewegen und bei zunehmender Geschwindigkeit richtet sie sich zuletzt ganz senkrecht gegen den Strom. Ebenso zeigt sich eine solche Verminderung des Drucks, wenn man einen Luftstrom gegen eine feste Wand richtet; denn es bewegt sich eine vor dieser Wand neben dem Luftstrom aufgestellte Flamme nicht von der Wand fort, sondern nach ihr hin.

Richtet man einen Luftstrom gegen einen festen Cylinder, so tritt ganz dasselbe an der Fläche des Cylinders ein. Ist die Richtung dieses Stromes senkrecht gegen die Axe des Cylinders, und stellt man auf beiden Seiten, in geringer Entfernung, Lichtflammen oder kleine Windfahnen auf, so bewegen sich diese gegen den Cylinder, wenigstens wenn der Luftstrom von einer wenig größeren Breite als der Durchmesser des Cylinders ist. Es bringt also die Bewegung der Luft längs der Cylinderfläche nicht, wie man allgemein annimmt, eine Vermehrung des Drucks gegen diese hervor, sondern im Gegentheil eine Verminderung in einer gegen den Luftstrom senkrechten Richtung, und zwar eine um so größere, je größer die Geschwindigkeit der Luft ist.

1) Abhandlungen der Academie der Wissenschaften zu Berlin für 1848 S. 135. Pogg. Ann. LXXX, S. 1.

Wie es zu einer solchen Verminderung des Druckes kommt, findet sich in der erwähnten Abhandlung §. 35. entwickelt ¹⁾).

1) Die dort gelieferte Erklärung will ich hier in etwas veränderter Form wiedergeben.

Wenn eine Flüssigkeit, sie mag tropfbar oder elastisch flüssig seyn, durch eine Oeffnung in einen Raum strömt, der mit der gleichartigen, aber in Ruhe befindlichen Substanz erfüllt ist, so breitet sich die bewegte Masse aus, so daß ihre Querschnitte um so größer sind, je weiter sie von der Einströmungsöffnung entfernt genommen werden. Geschieht das Zuströmen mit unveränderter Geschwindigkeit, so ist, nach einiger Zeit, an jeder Stelle der sich bewegenden Masse die Geschwindigkeit unverändert, dabei ist sie jedoch in den verschiedenen Querschnitten um so geringer, je weiter diese von der Einströmungsöffnung entfernt sind. Nimmt man an, daß alle Theile, welche gleichzeitig durch denselben Querschnitt P gehen, gleiche Geschwindigkeit C haben, so ist die Masse, welche durch diesen Querschnitt in der Zeiteinheit hindurchgeht, PC ; und wenn P_1 die Größe eines entfernteren, und also größeren Querschnitts, und C_1 die in demselben vorhandene Geschwindigkeit bezeichnet, so ist die Masse, welche durch diesen Querschnitt in der Zeiteinheit hindurchgeht $P_1 C_1$. Die bewegende Kraft oder die Quantität der Bewegung in den verschiedenen Querschnitten ist aber das Product der Masse, welche in der Zeiteinheit sich durch dieselben bewegt, in ihre Geschwindigkeit, d. i. PC^2 und $P_1 C_1^2$.

Diese Quantitäten müssen einander gleich seyn. Denn es ist gar kein Grund vorhanden, weshalb die Quantität der Bewegung sich ändern sollte. Zwar wird in jedem folgenden Querschnitt die Bewegung an eine größere Anzahl von Theilen der Flüssigkeit übertragen als in dem vorhergehenden, und deshalb wird die Geschwindigkeit derselben geringer, allein da alle Theile der Flüssigkeit vollkommen bewegbar sind, so kann, wenn man absieht von dem Einfluß der Reibung, nichts von der Quantität der Bewegung aufgehoben oder vernichtet werden. Es ist also

$$P_1 C_1^2 = PC^2$$

und da $C_1 < C$; so ist

$$P_1 C_1 > PC.$$

d. h. es ist die Masse, welche durch den entfernteren Querschnitt in der Zeiteinheit hindurchgeht, größer als die, welche in derselben Zeit durch den der Einströmungsöffnung näheren geht.

Dies ist nur dadurch möglich, daß, von der seitlich ruhenden ein Theil in die bewegte Masse hineintritt. Die oben erwähnte Abhandlung enthält (§. 33) für tropfbare Flüssigkeiten den experimentellen Beweis, daß die zur Seite befindliche Masse sogar bis in die Mitte der bewegten gelangt; ohne Zweifel geschieht dies bei den luftförmigen in

Dreht sich der Cylinder nicht, so ist die Verminderung des Luftdrucks auf beiden Seiten gleich. Dreht er sich aber, so ist auf der Seite, die sich in gleicher Richtung mit der Luft bewegt, die Geschwindigkeit und folglich auch die Verminderung des Drucks größer als auf der anderen, wo eine der Luft entgegengesetzte Bewegung stattfindet. Der Versuch zeigt aber auf dieser Seite, die sich dem ankommenden Luftstrome entgegen bewegt, keine Verminderung, sondern eine Vergrößerung des Luftdrucks, so daß hier der Druck senkrecht gegen die Richtung des ankommenden Luftstroms größer ist, als er an dieser Stelle seyn würde wenn keine Bewegung stattfände. Der Grund hiervon ist folgender.

Aus den Untersuchungen von Savart weiß man, daß

ganz ähnlicher Weise, und dadurch entsteht bei beiden eine Verminderung des Drucks senkrecht gegen die Richtung, in welcher die ursprüngliche Bewegung sich fortpflanzt. Die Verminderung des seitlichen Drucks beruht hiernach wesentlich darauf, daß die in Bewegung befindliche Masse sich ausbreitet, oder daß in jedem entfernteren Querschnitt eine größere Anzahl von Flüssigkeittheilen sich bewegen.

Daß die Verminderung des seitlichen Drucks auf der Ausbreitung der Flüssigkeit beruht, davon kann man sich leicht überzeugen, indem man Luft oder eine tropfbare Flüssigkeit mit einiger Geschwindigkeit durch eine horizontale Röhre bewegt, die überall denselben Durchmesser hat. Strömt die Flüssigkeit in dieselbe durch eine Oeffnung, deren Querschnitt dem der Röhre gleich ist, so daß sie sich also in der Röhre nicht ausbreitet, so findet auch keine Verminderung des seitlichen Drucks statt. Denn wenn aus dieser horizontalen Röhre ein enges Rohr vertical in ein Gefäß mit Wasser hinabgeht, so steigt während der Bewegung in dem horizontalen Rohre, das Wasser in dem verticalen nicht in die Höhe. Ist aber die Oeffnung, durch welche die Flüssigkeit in das horizontale Rohr strömt, kleiner als der Querschnitt dieses Rohrs, und es geht das enge Rohr da nieder, wo die bewegte Flüssigkeit sich noch ausbreitet, so sieht man das Wasser in die Höhe steigen. Strömt die Flüssigkeit in die horizontale Röhre aus einem weiten Gefäß, unter größerem Druck, so zeigt sich unmittelbar hinter der Einströmungsoeffnung, auch wenn diese denselben Durchmesser wie das horizontale Rohr hat, eine Verminderung des seitlichen Drucks. Diese rührt aber gleichfalls von einer Ausbreitung her, indem die in das horizontale Rohr strömende Flüssigkeit sich zusammenzieht, und sich darauf jenseits ihrer größten Zusammenziehung wieder ausbreitet.

wenn zwei Strahlen einer tropfbaren Flüssigkeit sich gegen einander bewegen, die beide aus kreisrunden Oeffnungen von demselben Durchmesser mit gleicher Geschwindigkeit so hervorgehn, daß ihre Axen in derselben geraden Linie liegen, die Bewegung dadurch nicht gleich Null wird, sondern die Flüssigkeit sich seitwärts bewegt und eine kreisförmige Scheibe bildet, welche senkrecht gegen die Richtung der Strahlen ist. Ueberhaupt, wenn zwei Massen von Flüssigkeit sich gegen einander bewegen, so heben die Bewegungen sich nicht, wie bei festen Körpern auf, sondern es entsteht eine seitliche Bewegung, deren Richtung und Geschwindigkeit von dem Verhältniß der Massen, die einander treffen, sowie von deren Geschwindigkeit abhängt.

Bei dem Versuche mit dem Cylinder bewegt sich auf der einen Seite die Luft durch die Rotation dem ankommenden Luftstrom entgegen, deshalb entsteht auch hier eine seitliche Bewegung der Luft, durch welche die Windfahne auf dieser Seite fortgedrückt wird. Diese ist bei einem gewissen Verhältniß der Geschwindigkeiten beider Luftmassen ein Maximum, und normal gegen die Richtung derselben. Daher wurde auch die Windfahne, wie oben erwähnt, am stärksten zur Seite gedrückt, wenn ein bestimmtes Verhältniß der durch die Rotation erzeugten Geschwindigkeit und der des ankommenden Luftstromes vorhanden war.

Die Anwendung dieser Versuche auf die Abweichung der kugelförmigen Geschosse ergibt sich von selbst.

Rotirt eine Kugel während ihrer fortschreitenden Bewegung so, daß die Drehungsaxe sich stets in der Hauptnormale der Flugbahn befindet, und nennt man die Bewegung der Kugel, wenn der vorangehende Theil derselben sich von links nach rechts in Bezug auf den hinter dem Geschütz befindlichen Beobachter dreht, eine rechtsdrehende, wenn hingegen der vorangehende Theil sich von rechts nach links bewegt, eine links drehende, so folgt unmittelbar aus den eben beschriebenen Versuchen, daß bei der

rechtsdrehenden Kugel gegen ihre rechte Seite eine Verminderung des Luftdruckes stattfindet, gegen ihre linke Seite hingegen eine Vermehrung, das Geschofs weicht daher nach rechts ab. Ebenso weicht das linksdrehende Geschofs nach links ab.

Ist die Drehungsaxe des Geschosses senkrecht gegen die Ebene der Bahn, oder wenn diese von doppelter Krümmung ist, gegen die Osculationsebene, so findet zwar keine seitliche Abweichung statt, aber der Druck der Luft ist über und unter der Kugel verschieden. Bewegt sich der obere Theil derselben in der Richtung der Fortschreitung, so ist er von oben gröfser als von unten, das Geschofs senkt sich, und die Schufsweite ist daher geringer als sie sein würde, wenn der Druck von oben und von unten gleich wäre. Bewegt sich der untere Theil der Kugel in der Richtung ihrer Fortschreitung, so ist der Druck von unten gröfser und sie hebt sich, die Schufsweite ist daher gröfser. Nur wenn die Drehungsaxe stets Tangente der Bahn wäre, so fände keine Abweichung durch die Rotation statt. In jeder andern Lage derselben mufs entweder eine Seiten- oder eine Längenabweichung, oder eine Seiten- und Längenabweichung erfolgen.

Diese durch die angeführten Versuche, wie ich glaube, hinreichend begründete Erklärung von der Abweichung der kugelförmigen Geschosse, ist zwar den bisher gebräuchlichen Vorstellungen vom Widerstande der Luft entgegen, aber sie ist darum nicht weniger richtig. Um sie jedoch gegen jeden Einwand sicher zu stellen, wäre noch übrig nachzuweisen, dafs der Unterschied des auf beiden Seiten des Geschosses vorhandenen Luftdruckes grofs genug ist, um eine Abweichung des Geschosses selbst hervorzubringen. Da man bis jetzt die Gröfse dieses Unterschiedes nicht messen kann, so habe ich versucht im Kleinen eine seitliche Bewegung durch denselben hervorzubringen, um auf diese Weise darzuthun, dafs der Unterschied des Luftdruckes hinreichend ist, die Geschosse von ihrer Bahn abzulenken.

Um eine solche Ablenkung zu erzeugen, wurde ein leichter hohlgearbeiteter Cylinder aus Messing, 3 Zoll hoch 2 Zoll im Durchmesser, *ab* Fig. 2, Taf. I. benutzt, der sehr leicht um seine Axe beweglich war, die zwischen zwei in einem Ringe aus Metall befestigten Spitzen lief. Derselbe wurde mit diesem Ringe an dem einen Ende eines leichten, 4 Fufs langen Balkens *yz* aus Holz befestigt, der in seiner Mitte an einem feinen, 8 Fufs langen Metalldraht *vw* aufgehängt war, und eine Art Drehwaage bildete. Um ihn horizontal zu erhalten trug er an seinem andern Ende ein verschiebbares Gegengewicht *p*, und außerdem war er noch durch zwei Schnüre *rt* und *ru* an den Punkten *t* und *u*, welche gleich weit von der Mitte *v* entfernt waren, in schräger Richtung mit dem verticalen Draht verbunden. Diese Verbindung hatte zum Zweck schwankende Bewegungen so viel als möglich zu vermeiden. Zu demselben Zwecke ging auch noch ein seidener Faden *vc* von der Mitte *v* des Balkens herab, und war genau senkrecht unter dem Aufhängepunkt des Drahts *w* so befestigt, daß der Drehungspunkt *v* des Balkens sich nur um so viel aus seiner Lage entfernen konnte, als die Elasticität des Drahts *wv* und des seidenen Fadens *vc* gestatteten.

Um den Cylinder in Rotation zu versetzen war in der Verlängerung seiner Axe eine kleine Rolle *e* angebracht, um welche eine dünne seidene Schnur gewickelt wurde. Indem man diese schnell abzog, erhielt der Cylinder eine rotirende Bewegung, die für einige Zeit, etwa 2 bis 3 Minuten anhielt. Während der Cylinder rotirte wurde ein Luftstrom gegen ihn gerichtet. Zur Erzeugung desselben diente das oben pag. 4. beschriebene kleine Centrifugalgebläse *EF*. Dasselbe war so aufgestellt, daß die Luft in der Richtung des Balkens *yz* von dem Drehungspunkte *v* sich gegen den bei *z* befestigten Cylinder bewegte, der in einer Entfernung von 2 Zoll vor der Oeffnung *mn* des Centrifugalgebläses sich vertical in seinem Ringe befand, dessen Ebene senkrecht gegen die Richtung des Luftstroms war. Der Cylinder würde aus dem Luft-

strome herausgekommen seyn, sobald er sich zur Seite bewegte, wenn nicht dafür gesorgt gewesen wäre, daß das ganze Centrifugalgebläse so nachfolgen konnte, daß der Luftstrom stets in der Richtung des Balkens yz wirkte. Für diesen Zweck war dasselbe auf ein Brett AB aufgesetzt, das sich um eine verticale Axe c drehen liefs, und an seinem andern Ende ein Gegengewicht G trug.

Rotirte der Cylinder ohne daß ein Luftstrom gegen ihn wirkte, so blieb er an seiner Stelle. Ebenso blieb er in Ruhe, wenn er nicht rotirte und der Luftstrom gegen ihn gerichtet wurde. Traf aber der Luftstrom den rotirenden Cylinder, so bewegte sich dieser mit dem Waagebalken yz nach der Seite, auf welcher die Luft durch die Rotation und durch das Centrifugalgebläse in gleichem Sinne bewegt wurde, wie diess in Fig. 3 Taf. I. durch die Pfeile angedeutet ist. Dasselbst bezeichnet a die Richtung des Luftstroms, b den Sinn der Rotation des Cylinders, und c die Richtung der Abweichung.

Folgte das Centrifugalgebläse durch Drehung des Brettes AB dem Cylinder, so bewegte dieser sich so lange seitlich, als seine Rotation noch ziemlich stark war, oft durch einen vollen Kreis. Liefs man ihn im entgegengesetzten Sinne rotiren, so fand auch seine Bewegung nach der entgegengesetzten Seite statt. Wurde der Luftstrom unterbrochen, so hörte der Balken yz , an dem der Cylinder befestigt war, nicht sogleich auf sich zu bewegen, weil sein Trägheitsmoment ziemlich bedeutend war. Wenn man, während der Cylinder rotirte und sich durch den gegen ihn gerichteten Luftstrom mit dem Balken yz nach einer Seite bewegte, diesen nach der andern Seite hinüberstiefs, dabei aber mit dem Centrifugalgebläse folgte, so hörte die durch den Stofs ertheilte Bewegung bald auf und verwandelte sich in die ursprüngliche. Es konnte daher gar nicht zweifelhaft sein, daß die seitliche Bewegung des Cylinders durch seine Rotation und die gleichzeitige Einwirkung des Luftstroms entstand.

Zwar übte der Luftstrom gegen die Fläche des Ringes,

in dem der Cylinder rotirte, auch einen Druck aus, und wenn diese Fläche nicht senkrecht gegen die Richtung des Stromes war, so wurde der Ring, wenn der Cylinder nicht rotirte, zur Seite bewegt. Dafs aber die beobachtete Abweichung des rotirenden Cylinders nicht von solcher Stellung des Ringes herrührte, geht daraus hervor, dafs selbst wenn die Ebene desselben so gestellt wurde, dafs sie während der Cylinder rotirte, einen Winkel von 45 Grad mit dem Luftstrom machte, die Seitenabweichung nach rechts oder nach links stattfand, je nachdem der Cylinder nach rechts oder nach links rotirte; woraus hervorgeht, dafs der seitliche Druck gegen die Fläche des nur 0,25 Zoll breiten Ringes nur sehr gering und fast verschwindend gegen die Kraft war, mit welcher der Cylinder durch seine Rotation sich seitlich bewegte.

Berücksichtigt man die grofse Peripherie-Geschwindigkeit eines rotirenden Geschosses im Vergleich mit der des Cylinders, so ist es ganz unzweifelhaft, dafs der Unterschied des Luftdrucks gegen die einander gegenüberliegenden Seiten eines solchen Geschosses grofs genug ist, um eine seitliche Abweichung desselben zu erzeugen.

Hiernach glaube ich die gegebene Erklärung von der Abweichung der kugelförmigen Geschosse als die richtige betrachten zu können.

2. Ueber die Abweichung länglicher Geschosse.

In neuerer Zeit sind in verschiedenen Artillerien Versuche mit länglichen Hohlgeschossen gemacht worden, die aus gezogenen Geschützen abgefeuert werden. Dieselben haben fast überall, wo sie angewendet werden, eine cylindrische Gestalt mit conischer oder ogivaler Zuspitzung, während ihr hinteres Ende, oder ihre Basis, entweder eben oder halbkugelförmig abgerundet ist. Sie erhalten durch die Züge eine Drehung um ihre Axe d. i. um die Linie von der Spitze des Conus nach der Mitte der Basis, oder wenigstens um eine dieser sehr nahe liegende Linie. An allen den Stellen, von welchen die Versuche mit solchen

gezogenen Geschützen veröffentlicht sind, hat man ebenfalls eine Seitenabweichung der Geschosse beobachtet¹⁾, aber stets nach derselben Seite, nämlich nach der Rechten des Beobachters, der hinter dem Geschütze steht und dieses ansieht. Es drängt sich daher die Frage auf, ob diese Seitenabweichung, die übrigens sehr viel geringer ist als die bei den kugelförmigen Geschossen, welche aus glatten Röhren gefeuert werden, sich auf dieselbe Weise erklären lasse wie diese.

Dafs die Abweichung der länglichen Geschosse stets nach derselben Seite stattfindet, rührt ohne Zweifel davon her, dafs die Züge in den Geschützen immer in demselben Sinne gewunden sind, nämlich so, dafs wenn ein Beobachter hinter dem Geschosse dies ansieht und die Richtung verfolgt, in welcher ein Punkt sich in dem Zuge von ihm fortbewegt, dieser in dem oberen Theile des Rohrs von links nach rechts und in dem unteren von rechts nach links, oder, um es kürzer auszudrücken, wie der Zeiger einer Uhr geht.

Ich werde diese Art Züge rechtsläufige nennen, die in entgegengesetzter Richtung fortschreitenden linksläufige.

So viel mir bekannt, sind bis jetzt noch keine Beobachtungen angestellt über die Richtung, in welcher die Seitenabweichung bei linksläufigen Geschützen stattfindet. Aber die constante Abweichung nach rechts bei den rechtsläufigen läfst keinen Zweifel darüber, dafs die Richtung dieser Abweichung durch die Richtung der Züge bedingt werde, und dafs bei linksläufigen unfehlbar auch eine Abweichung nach links eintreten würde.

Gewifs wäre es wünschenswerth, auch einmal ein Geschütz mit linksläufigen Zügen zu versehen, um durch die Erfahrung festzustellen, dafs bei diesen die Seitenabweichung im entgegengesetzten Sinne als bei den gewöhnlich angewandten, rechtsläufigen stattfindet.

Bei dem Schiessen solcher länglichen Geschosse gegen

1) Auch bei den aus Gewehren abgefeuerten spitzen Geschossen soll eine ähnliche Abweichung in neuerer Zeit beobachtet seyn.

eine Scheibe hat sich ergeben, daß die Axe des Geschosses annähernd in der Tangente der Flugbahn liegt. Läge sie stets genau in dieser Tangente, so würde der Widerstand der Luft, da er in der Richtung der Tangente gegen das Geschofs statt hat, stets parallel der Axe wirken. Es würde dann die Bewegung der Luft rund um die Axe ganz dieselbe sein, folglich könnte der Widerstand eine Seitenabweichung nicht hervorbringen. Allein die Axe ist nicht genau Tangente der Flugbahn, wie aus den später zu erwähnenden Versuchen hervorgeht. Sie macht vielmehr stets einen, wenn auch nur sehr kleinen Winkel mit der Tangente, und unter diesem Winkel trifft daher auch der Widerstand der Luft das Geschofs.

Man könnte glauben, daß dieser kleine Winkel genüge, um, in ähnlicher Weise wie bei den kugelförmigen Geschossen, eine Verminderung des Luftdrucks auf der einen und eine Vermehrung auf der andern Seite hervorzubringen. Bei näherer Betrachtung ergibt sich aber, daß wenn dies der Fall sein sollte, bei den rechtsdrehenden Geschossen die Verminderung des Drucks auf der linken Seite des obenerwähnten Beobachters stattfinden würde, und die Geschosse folglich nach dieser Seite abweichen müßten, während sie in der That nach der entgegengesetzten d. i. nach der rechten Seite abweichen.

Die Ursache der Abweichung muß daher bei den länglichen Geschossen eine andere als bei den kugelförmigen seyn.

Um diese Ursache aufzufinden, schien es vor Allem nothwendig, die Richtung der Axe der Geschosse während ihrer Bewegung genauer kennen zu lernen.

Mit der größten Zuvorkommenheit haben die Herren Mitglieder der Kgl. Artillerie-Prüfungs-Commission, welche mit der Ausführung der Versuche dieser Commission beauftragt sind, einige Versuche für diesen Zweck anstellen lassen. Es wurden nämlich mehrere solcher länglicher Geschosse mit einer so geringen Pulverladung abgefeuert, daß es möglich war dieselben während ihres Fluges mit den

den Augen zu verfolgen und die Lage der Axe zu beobachten. Die Herren Mitglieder der Commission haben selbst die Güte gehabt bei diesen, in meiner Gegenwart ausgeführten Versuchen sich der Beobachtung der Geschosse zu unterziehen. Das Resultat war folgendes:

Während der Bewegung des Geschosses wurde, nach der übereinstimmenden Beobachtung aller, seitwärts von der Bahn aufgestellten Personen, die Axe des Geschosses nahe in der Tangente der Flugbahn erblickt, dabei war aber in dem absteigenden Aste der Bahn deutlich zu erkennen, daß die Spitze etwas höher lag, als sie hätte liegen müssen, wenn die Axe genau Tangente gewesen wäre.

Zugleich liefs sich bei allen Schüssen, sowohl aus der Bewegung der Geschosse durch die Luft als auch aus der Form der Furchen, welche dieselben in den Boden gerissen hatten, deutlich erkennen, daß die Spitze im Augenblicke des Aufschlagens um etwas nach rechts abgelenkt war. Etwa so wie dies Fig. 4, Taf. I. darstellt, in welcher AB die ursprüngliche Richtung des Schusses, CD die Richtung der Aufschlagsfurche, und ab die Richtung der Axe in dem Augenblicke bezeichnet, in welchem das Geschofs zum Boden gelangte.

Wenn ein Geschofs in solcher Richtung auf den Boden aufschlägt, und die Spitze berührt diesen zuerst, so kann sogar während des Eindringens ein Umschlagen in der Art stattfinden, daß der hintere Theil des Geschosses nach vorn zu liegen kommt. Dies war auch bei den meisten Schüssen wirklich der Fall, denn die Geschosse, welche in der Erde stecken blieben, fanden sich in einer solchen Lage gegen die Schufslinie, wie sie in Fig. 5, Taf. I. angedeutet ist, in welcher AB die Schlufslinie und ab die Lage der Geschofsaxe in der Erde darstellt; wobei jedoch die Spitze b viel tiefer liegend als der hintere Theil a gedacht werden muß.

Es geht aus diesen Beobachtungen hervor, daß die Axe des Geschosses während der translatorischen Bewegung nicht nur nicht genau mit der Tangente zusammen-

fällt, sondern dafs sie auch mit der, durch die Tangente gehenden Verticalebene einen Winkel macht, und so von dieser Ebene abweicht, dafs die Spitze des Geschosses in Bezug auf den hinter dem Geschütz befindlichen Beobachter nach rechts liegt.

Geht man von der Voraussetzung aus, dafs die Axe des Geschosses während der ganzen Flugbahn die angegebene Lage gegen die durch die Tangente gehende Verticalebene hat, so ist leicht einzusehen, dafs dann das Geschofs durch den Widerstand der Luft nach derselben Seite hinübergedrückt wird, da dieser hier wie gegen eine geneigte Ebene wirkt. Könnte man daher das Vorhandensein einer Kraft nachweisen, welche die Axe des Geschosses so dreht, dafs dieselbe einen Winkel mit der durch die Tangente gehenden Verticalebene macht, so würde dadurch auch der Grund der seitlichen Abweichung des ganzen Geschosses nachgewiesen sein.

Wenn auf die Axe eines Körpers, der durch Drehung einer Curve um diese Axe entstanden ist, eine Kraft einwirkt, welche nicht durch den Schwerpunkt geht, so bewegt diese, so lange der Körper nicht rotirt, die Axe in der Ebene, welche durch die Richtung der Kraft und die Axe gelegt werden kann. Rotirt aber der Körper mit grosser Geschwindigkeit, so wird die Axe nicht in dieser Ebene gedreht, sondern sie bewegt sich zur Seite und beschreibt, wenn der Schwerpunkt als fester Punkt gedacht wird, einen Kegel.

Auf diesem Satze beruht die von dem Vorrücken der Nachtgleichen, so wie von der Nutation gegebene Erklärung. Bohnenberger¹⁾ hat um denselben durch Versuche anschaulich zu machen, einen kleinen Apparat sehr sinnreich erdacht, und Poisson hat jenen Satz ausführlich in einem eignen Memoire behandelt, das sich im Cahier XVI, p. 247 des *Journal de l'Ecole polytechnique* findet.

1) Gilbert's Ann. LX. 60. *Tübinger Blätter für Naturwissenschaften und Arzneikunde* von v. Autenrieth u. Bohnenberger Bd. III. Heft I.

Bohnenberger's Apparat besteht aus einem abgeplatteten, runden Körper, einem Sphäroid, das um seine Axe sehr leicht drehbar, und in drei Ringen so aufgehängt ist, dafs man der Axe jede beliebige Richtung ertheilen kann.

Ich habe einen ähnlichen Apparat ausführen lassen, der aber statt des Sphäroids einen Körper von der Form der oben beschriebenen länglichen Geschosse in verkleinertem Maafstabe enthält. Sein cylindrischer Theil hat 2 Zoll Durchmesser und ist ebenso hoch. Die Höhe aber des ganzen Körpers aus Messing, mit seiner rechtwinklig konischen Zuspitzung, beträgt 3,4 Zoll. An der Spitze desselben ist mit der Axe eine kleine Rolle verbunden, die dazu dient eine dünne seidene Schnur aufzuwickeln. Durch schnelles Abziehen derselben erhält der Körper eine Rotation, die während einiger Zeit mit fast unveränderter Geschwindigkeit dauert. Der ganze Apparat ist in Fig. 6, Taf. I abgebildet. Die stählerne Axe ab des Körpers L bewegt sich zwischen zwei Spitzen, die in dem innern Ringe EF befestigt sind. Durch die Aufhängung in den Ringen ist es zwar möglich, die Axe in jede beliebige Lage zu bringen, damit sie aber in dieser verbleibe, ist es nothwendig, dafs der Schwerpunkt des Körpers, und auch der der Ringe, in dem Mittelpunkte der letzteren sich befinden. Es ist deshalb der äufserlich ganz geschlossene Körper L zum Theil hohl.

Die Ausführung dieses Apparates ist nicht ganz leicht und erfordert in sofern einen sehr genauen Arbeiter, als es besonders darauf ankommt, dafs der Schwerpunkt bei jeder Lage des Körpers L in dem gemeinsamen Mittelpunkte sämmtlicher Ringe sich befinde. Hierzu ist nothwendig, dafs die beiden Drehungsaxen der inneren Ringe AB und EF und die Axe ab des Körpers sich in einem Punkte schneiden, und dafs in diesem auch der Schwerpunkt liege. Um dies letzte zu erreichen, lassen sich die Spitzen a und b durch Schrauben vor- und rückwärts bewegen.

Bei dieser Einrichtung ist, so lange keine Rotation statt-

findet, jeder Ring durch die geringste Kraft leicht beweglich. Läßt man den Körper aber rotiren, so bedarf es einer sehr merklichen Kraft, um einen der Ringe auch nur um wenig aus seiner Lage zu bringen. Daher beharrt auch die Axe ab des Körpers während der Rotation unverändert in ihrer Richtung.

Läßt man nun, während der Körper rotirt, eine Kraft gegen die Axe wirken, die nicht durch den Schwerpunkt geht; ist z. B. die Axe des Körpers gegen den Horizont geneigt, und es wirkt eine verticale Kraft auf sie ein, hervorgebracht durch ein Gewicht, das an dem Ringe EF in der Nähe des Endpunktes der Axe bei b angebracht ist, so bewegt sich die Axe nicht in der verticalen Ebene, sondern sie beschreibt einen Kegel, indem sie damit anfängt sich sehr langsam horizontal nach einer Seite zu bewegen. Wirkt die Kraft statt in verticaler in horizontaler Richtung, so beschreibt die Axe einen Kegel, indem sie damit anfängt sich sehr langsam vertical nach unten oder nach oben zu bewegen. Ueberhaupt beginnt diese Bewegung stets in einer gegen die Ebene, welche durch die Richtung der Kraft und die Rotationsaxe geht, senkrechten oder annähernd senkrechten Richtung. Nach welcher Seite von dieser Ebene die Bewegung aber stattfindet, ist für die folgenden Betrachtungen besonders wichtig.

Denkt man sich in der Verlängerung der Rotationsaxe über die Basis hinaus einen Beobachter, der den Körper wie den Zeiger einer Uhr, oder nach rechts rotiren sieht, und wirkt die Kraft an dem von diesem Beobachter abgewandten Ende der Axe, d. i. an der Spitze des Körpers L , so bewegt sich diese Spitze, wenn die Kraft von unten nach oben wirkt, nach der Rechten jenes Beobachters; wirkt hingegen die Kraft von oben nach unten, so bewegt sich die Spitze nach der Linken. Ist die Kraft an dem andern, dem Beobachter zugewandten Ende, d. i. in der Nähe der Basis wirksam, so bewegt sich jenes abgewandte Ende, oder die Spitze, wenn die Kraft von unten nach oben wirkt, nach links: wirkt sie aber von oben nach unten, so bewegt sie

sich nach der Rechten des Beobachters. Findet die Rotation des Körpers in entgegengesetzter Richtung statt, also der des Zeigers der Uhr entgegen oder nach links, so bewegt sich auch das abgewandte Ende der Axe in allen angeführten Fällen entgegengesetzt.

Stellt man sich statt des aufgehängten Körpers ein längliches Geschoss von der vorher beschriebenen Art vor, welches während seiner fortschreitenden Bewegung um seine Axe rotirt, und betrachtet die Wirkung, welche der Widerstand der Luft auf ein solches ausübt, so ist leicht einzusehen, daß die Resultante des Drucks, welchen dieser Widerstand hervorbringt, zwar durch die Axe, aber, bei der vorausgesetzten Gestalt des Körpers, im Allgemeinen nicht durch den Schwerpunkt geht. Es bildet deshalb der Widerstand der Luft eine Kraft, durch welche die Spitze des Geschosses sich seitwärts bewegen und einen Kegel beschreiben muß. Ob diese Bewegung der Spitze nach rechts oder nach links stattfindet, hängt, wie so eben gesagt worden, davon ab, ob die Resultante des Widerstandes oberhalb oder unterhalb des Schwerpunktes gegen die Axe wirkt, vorausgesetzt, daß die Rotation in beiden Fällen in demselben Sinne geschieht.

Aus den vorher angeführten Beobachtungen der mit geringer Ladung abgefeuerten Geschosse geht hervor, daß die Axe derselben sich der Richtung der Tangente nähert, daß folglich die Lage der Spitze sich gegen die Lage des Schwerpunktes während des Fluges senkt. Hieraus scheint zunächst zu folgen, daß die Resultante des Widerstandes durch den unter oder hinter dem Schwerpunkt liegenden Theil der Axe geht. Wäre dieß aber der Fall, so würde die Spitze eines nach rechts sich drehenden Geschosses nach der Linken des hinter demselben stehenden Beobachters abweichen, und dann würde auch der Schwerpunkt des Geschosses nach dieser Seite hinüber gedrückt werden, also eine Seitenabweichung entstehen, die der beobachteten gerade entgegengesetzt ist.

Ich gestehe, daß dieser Widerspruch mit der Erfahrung

mich während längerer Zeit veranlaßt hat, eine andere Erklärung von der Abweichung der länglichen Geschosse zu suchen, bis die in dem Folgenden beschriebenen Versuche mich belehrten, daß der Widerspruch nur scheinbar, und die Voraussetzung, die Resultante des Widerstandes schneide die Axe des Geschosses unterhalb des Schwerpunktes, unrichtig ist. Es kann sich nämlich die Spitze des Geschosses auch senken, selbst wenn die Resultante des Widerstandes gegen den oberhalb des Schwerpunktes liegenden Theil der Axe von unten nach oben drückt. Zwar wird dann die Spitze zunächst gehoben, allein, bei hinreichender Rotationsgeschwindigkeit des Geschosses, ist diese Hebung kaum merklich, und es tritt statt ihrer eine Bewegung der Spitze nach rechts ein.

Sobald aber diese Bewegung angefangen hat, so ist die Ebene, welche durch die Richtung des Widerstandes, d. i. die Tangente der Flugbahn, und durch die Axe des Geschosses geht, nicht mehr vertical, und mit zunehmender Abweichung der Spitze nimmt die Neigung dieser Ebene gegen den Horizont immer mehr zu. Da nun, wie bereits oben erwähnt, die Spitze stets senkrecht oder annähernd senkrecht gegen diese Ebene sich bewegt, so ergibt sich aus dem, was oben über die Richtung dieser Bewegung angeführt worden, daß die Spitze sich senken muß.

Dieses Senken der Spitze kann sogar soweit sich erstrecken, daß sie unter der durch den Schwerpunkt gehenden Tangente zu liegen kommt. Alsdann wirkt der, der Tangente parallele Widerstand der Luft von oben nach unten gegen die Spitze (oben und unten bezogen auf den vorher erwähnten Beobachter) und dadurch nimmt die seitliche Bewegung der Spitze die entgegengesetzte Richtung an. Während des Fluges des Geschosses ist, bei der kurzen Dauer desselben, eine so starke Neigung der Spitze nicht zu erwarten, allein für die folgenden Versuche ist es beachtenswerth, daß, wenn eine solche eintritt, die Spitze sich nach der entgegengesetzten Seite bewegen muß.

Um zu ermitteln, ob die Resultante des Widerstandes

der Luft durch den vor oder durch den hinter dem Schwerpunkte liegenden Theil der Axe geht, wurden folgende Versuche angestellt. Gegen den oben beschriebenen, in drei Ringen aufgehängten Körper *L* Taf. I, Fig. 6 wurde ein Luftstrom geleitet, der in seinem ganzen Querschnitt gleich stark, und von solcher Ausdehnung war, daß sich der Körper, welche Lage er auch annehmen mochte, ganz in demselben befand.

Zur Hervorbringung dieses Luftstroms diente ein starker Blasebalg, durch den die Luft zunächst in eine sogenannte Windlade geprefst wurde. Diese bestand aus einem Kasten, der 1 Fufs hoch und ebenso lang und breit war, und eine viereckige Oeffnung von 3 Zoll im Quadrat hatte. So groß mußte sie sein, damit der Körper bei jeder Lage sich ganz in demselben befand. Da aber die durch den Blasebalg zugeführte Luft nicht genügend war, um einen gleichförmigen und hinreichend starken Strom von solchem Querschnitt zu erzeugen, so wurde vor diese Oeffnung ein Blech mit 484 feinen Löchern angebracht, die alle gleich weit von einander entfernt waren, und genau denselben Durchmesser von 1^{mm} hatten. Dadurch erhielt man zwar nicht einen, sondern statt dessen 484 parallele, dünne Luftströme von gleicher Stärke, diese konnten indess bei ihrem geringen Abstände von einander als ein einziger Luftstrom betrachtet werden, mindestens war ihre Wirkung auf den Körper *L* als ganz gleich mit der eines einzigen Luftstromes anzusehen.

Wurde nun der Apparat Fig. 6 Taf. I, so aufgestellt, daß der horizontale Luftstrom gegen den Körper *L* wirkte, während dieser nicht rotirte, seine Axe aber sich in der, durch die Mitte des Luftstroms gelegten verticalen Ebene befand, und einen kleinen Winkel mit dem Horizont machte, so wurde die Spitze, wenn sie über der durch den Schwerpunkt gehenden Horizontalebene lag, gehoben, lag sie aber unter derselben, so senkte sie sich.

Hieraus ergibt sich, daß die Resultante des Drucks, welchen der Luftstrom gegen diesen Körper ausübte, durch

den vor dem Schwerpunkt liegenden d. i. der Spitze zugewandten Theil der Axe ging.

Aehnlich wie dieser Luftstrom gegen den zugespitzten Körper, wirkt der Widerstand der Luft gegen ein längliches Geschoss. Es geht auch hier, wenn der Schwerpunkt, wie bei dem Körper *L*, in der Mitte der Länge sich befindet, die Resultante des Widerstandes durch den vor dem Schwerpunkt liegenden, d. i. der Spitze zugewandten Theil der Axe; und es findet dieß ohne Zweifel auch statt, wenn der Schwerpunkt nicht zu weit von der Mitte der Axe entfernt ist.

Die Hebung der Spitze des Körpers *L* und folglich auch die der länglichen Geschosse wird nur durch ihre zugespitzte Form bedingt, denn wurde der Körper *L* aus den Ringen herausgenommen, und statt seiner ein Cylinder von gleichem Durchmesser und gleicher Höhe, der aber an beiden Enden durch gegen seine Axe senkrechte Ebenen begrenzt war, in denselben Ringen angebracht, und dieser Cylinder in ähnlicher Weise wie der zugespitzte Körper dem Luftstrome ausgesetzt, indem seine Axe einen gleichen Winkel mit der horizontalen Richtung des Luftstromes machte, so nahm diese Axe stets die horizontale Lage an. Es senkte sich also bei dem Cylinder der dem ankommenden Luftstrom zugewandte Theil, während sich derselbe bei dem zugespitzten Körper hob, woraus hervorgeht, daß die Hebung bei dem letzteren nur von seiner zugespitzten Form herrührte.

Hierauf wurde der zugespitzte Körper in seinen Ringen dem horizontalen Luftstrom ausgesetzt, während er rotirte. Befand sich dabei seine Axe, wie vorher, in der durch die Mitte des Luftstroms gehenden verticalen Ebene, und war die Spitze etwas über der durch den Schwerpunkt gehenden Horizontalebene erhaben, so bewegte sie sich langsam seitwärts, anfangs in fast horizontaler Richtung, bald aber begann sie sich zu neigen. Rotirte der Körper nach rechts, so war auch die seitliche Bewegung der Spitze nach rechts, und rotirte derselbe nach links, so war auch

die Bewegung der Spitze nach dieser Seite. Hielt die Rotation so lange an, daß die Spitze bis unter die Horizontalebene sich senkte, so nahm dann die seitliche Abweichung der Spitze allmählig wieder ab. Sie bewegte sich also ganz so, wie es, nach dem was vorher angeführt worden, nothwendig geschehen muß, wenn die Resultante des Widerstandes durch den oberhalb des Schwerpunktes d. i. zwischen dem Schwerpunkt und der Spitze liegenden Theil der Axe geht.

Aus diesen Versuchen folgt, daß die Abweichung der länglichen Geschosse dadurch entsteht, daß der Widerstand der Luft die Spitze derselben zu heben sucht. Die hierdurch in der That erfolgende Hebung ist indess kaum bemerkbar, denn durch die Rotation setzen sich die auf die Masse des Geschosses einwirkenden Kräfte so zusammen, daß die Spitze statt sich zu heben, sich zur Seite bewegt, und zwar bei den rechts rotirenden Geschossen nach rechts. In Folge hiervon drückt der Widerstand der Luft auch den Schwerpunkt des Geschosses nach dieser Seite, und bringt so die Abweichung hervor. Zu gleicher Zeit senkt sich die Spitze, und dadurch hat es den Anschein, als ob der Druck der Luft gegen den hintern Theil des Geschosses größer als gegen den vorderen wäre, während er in der That gegen den vorderen Theil größer als gegen den hinter dem Schwerpunkt liegenden ist.

Hierdurch ist, wie ich glaube, die Ursache der Abweichung bei den länglichen Geschossen vollständig nachgewiesen, und damit die ganze, seit so langer Zeit unklare Erscheinung der Abweichung, sowohl der kugelförmigen als auch der länglichen Geschosse, vollkommen erklärt.

Ueber eine auffallende Erscheinung bei rotirenden Körpern.

Bei den so eben beschriebenen Versuchen hatte ich Gelegenheit eine Erscheinung zu beobachten, die, wiewohl sie sich als unmittelbare Folge aus den oben erwähnten Sätzen von der Bewegung rotirender Körper ergibt, doch hier

noch besonders beschrieben zu werden verdient, theils weil sie, wie ich glaube, wenig bekannt ist, theils weil sie besonders geeignet sein möchte die Vorgänge anschaulich zu machen, welche eintreten, wenn Kräfte auf einen rotirenden Körper einwirken, deren Resultante zwar durch die Drehungsaxe, aber nicht durch den Schwerpunkt geht.

Läfst man nämlich den Körper L in dem in Fig. 6, Taf. I abgebildeten Apparat um seine Axe rotiren, so ist, wie bekannt, eine ziemlich bedeutende Kraft erforderlich, um diese Axe oder einen der beiden inneren Ringe aus ihrer Lage zu entfernen. Hält man dann aber den mittlern Ring AB , in dem die Spitzen c und d , welche den innern Ring halten, angebracht sind, mit der Hand fest, so ist die Axe ab des rotirenden Körpers und mit ihr der Ring EF ganz leicht beweglich.

Versucht man daher einen solchen Apparat nur mit zwei Ringen zu construiren, deren äußerer fest steht, so nimmt die Axe, die sich dann nur in einer Ebene bewegen kann, keine feste Lage an, man mag den Körper so schnell rotiren lassen als man will. Die geringste Kraft reicht schon hin, ihn in eine andere Lage zu bringen.

Man pflegt gewöhnlich die unveränderliche Richtung der Axe eines Körpers dadurch zu erklären, daß eine bedeutende Kraft erforderlich sei, um jeden einzelnen Punkt desselben aus der Ebene zu entfernen, in welcher er rotirt. Die oben angeführten Versuche zeigen aber, daß diese Erklärung ungenügend ist.

Um diese auffallende Erscheinung noch in einer andern Beziehung anschaulich zu machen, habe ich den in Fig. 7, Taf. I abgebildeten Apparat ausführen lassen.

Derselbe besteht aus einer Axe von Eisen, die 9 Zoll lang ist, und an jedem Ende eine kreisrunde Scheibe von Messing trägt, welche 4 Zoll im Durchmesser hat, und 0,2 Zoll dick ist. Jede dieser Scheiben E und F ist mit einer kleinen Rolle versehen, um die sich ein seidener Faden wickeln läßt. Indem dieser schnell abgezogen wird, kann jede Rolle für sich in Rotation versetzt werden. Durch

den Schwerpunkt dieser ganzen Vorrichtung ist senkrecht gegen die Axe ein Stift CD befestigt, der durch die Oeffnungen C und D des Bügels CDG geht. Hierdurch ist AB wie der Balken einer Waage in diesem Bügel beweglich. Der Bügel selbst hängt bei G an einem Faden, um welchen das ganze System sich leicht drehen kann. Dadurch ist es möglich, die Axe AB in jede beliebige Lage zu bringen.

Setzt man eine von den beiden Scheiben E oder F in Rotation, so beharrt die Axe AB in der Lage, in die man sie gebracht hat, und es ist eine ziemlich bedeutende Kraft erforderlich, um sie aus derselben zu entfernen. Dasselbe findet in noch stärkerem Maasse statt, wenn beide Scheiben gleichzeitig in demselben Sinne rotiren. Hält man dann aber den Bügel CDG mit der Hand fest, so ist sogleich die Axe leicht beweglich, und es ist höchst überraschend, wie die Beweglichkeit derselben sich ändert, je nachdem man diesen Bügel anfaßt oder losläßt. Dies Verhalten ist dem so eben beschriebenen des Apparates mit den 3 Ringen ganz ähnlich.

Rotirt aber die eine von den beiden Scheiben nach rechts, während die andere nach links rotirt (diese Richtungen bezogen auf einen Beobachter, der sich an dem einen Ende der Axe AB befindet), so ist auch, wenn der Bügel CDG ganz frei gelassen wird, die Axe AB leicht beweglich, wenigstens so lange als beide Scheiben mit gleicher Geschwindigkeit rotiren. Werden ihre Geschwindigkeiten ungleich, so wird auch die Axe weniger leicht beweglich, und je größer der Unterschied der Geschwindigkeiten wird, um so mehr nimmt auch die Unveränderlichkeit der Axe zu.

Wenn auf einen Rotationskörper, dessen Axe nach allen Richtungen ganz frei beweglich ist, und der mit großer Geschwindigkeit um diese Axe rotirt, eine Kraft einwirkt, welche nicht durch den Schwerpunkt aber durch die Axe geht, und diese nimmt, wie oben erwähnt, eine seitliche Bewegung an, so ist die Geschwindigkeit dieser letzteren Bewegung stets nur sehr gering, nicht nur relativ zu der

Rotationsgeschwindigkeit, sondern auch zu der Bewegung, in welche die Axe versetzt worden wäre, wenn dieselbe Kraft eingewirkt hätte, ohne dafs der Körper rotirte. Deshalb glaubt man, die Axe beharre unveränderlich in ihrer Lage.

Eine Bewegung der Axe erfolgt bei jeder Einwirkung einer Kraft, die durch diese Axe aber nicht durch den Schwerpunkt geht, nur ist diese Bewegung, wenn der Körper sehr schnell rotirt, ausserordentlich gering, und deshalb ist die Axe anscheinend fest.

Wie diese Festigkeit der Axe mit der seitlichen Bewegung derselben zusammenhängt, geht besonders aus dem eben beschriebenen Versuch mit dem in Fig. 7, Taf. I abgebildeten Apparat hervor. Rotiren nämlich zwei gleiche Massen auf derselben Axe mit gleicher Geschwindigkeit, aber in entgegengesetztem Sinne, so wird durch Einwirkung einer Kraft, welche nicht durch den Schwerpunkt dieses Systems geht, die Axe nach zwei einander entgegengesetzten Richtungen gleich stark bewegt, es kann deshalb gar keine seitliche Bewegung stattfinden, und die Axe verhält sich gerade so, wie wenn durch eine mechanische Vorrichtung dafür gesorgt wäre, dafs sie sich nur in einer Ebene um ihren Schwerpunkt bewegen könnte. Ist aber die Rotationsgeschwindigkeit der beiden Massen nicht gleich, so sind auch die einander entgegengesetzten seitlichen Bewegungen der Axe verschieden, sie bewegt sich daher nach einer Seite. Aber die Festigkeit ihrer Lage ist dann um so geringer, je geringer die Differenz der beiden seitlichen Bewegungen ist.

Der scheinbare Widerspruch, der darin liegt, dafs die Axe eines rotirenden Körpers, wenn sie ganz frei ist, fest zu sein scheint, dagegen wenn sie sich nur in einer Ebene bewegen kann, leicht beweglich ist, giebt den eben erwähnten Versuchen etwas sehr überraschendes. Zugleich wird durch dieselben der Einflufs klar, welchen die freie Axe nicht nur auf die länglichen Geschosse, sondern über-

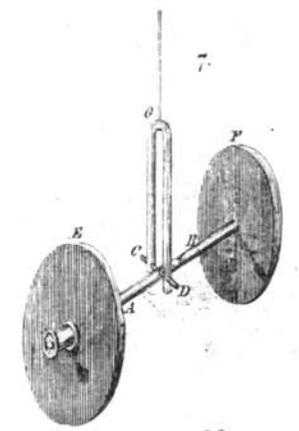
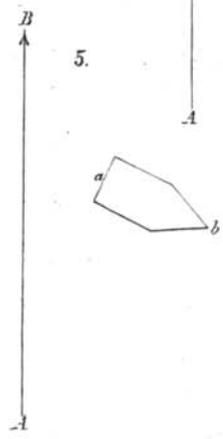
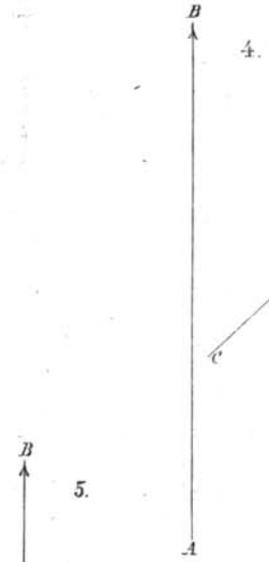
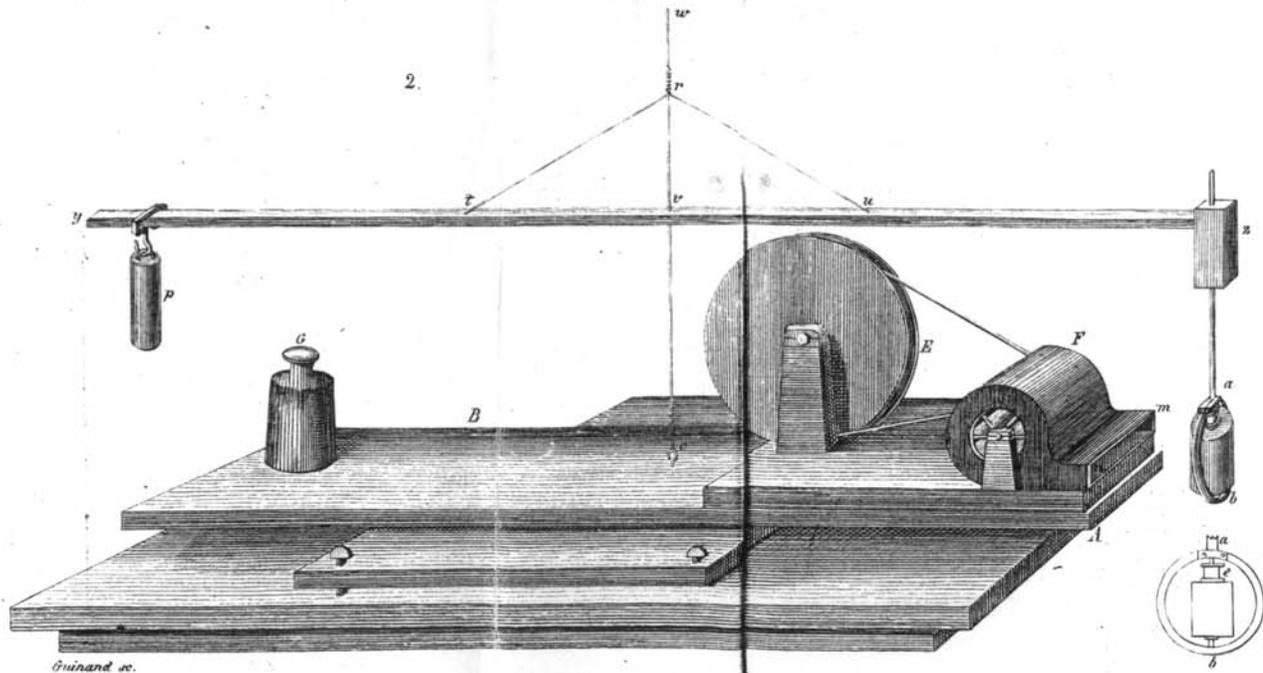
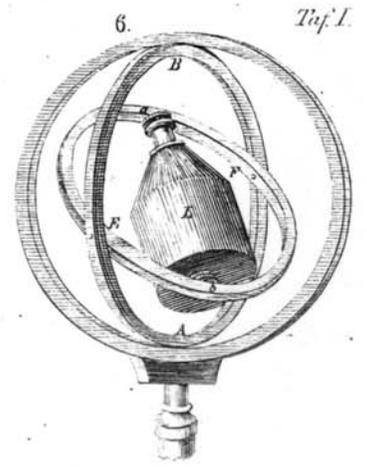
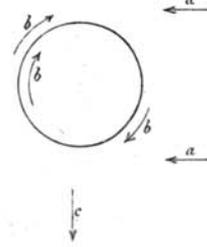
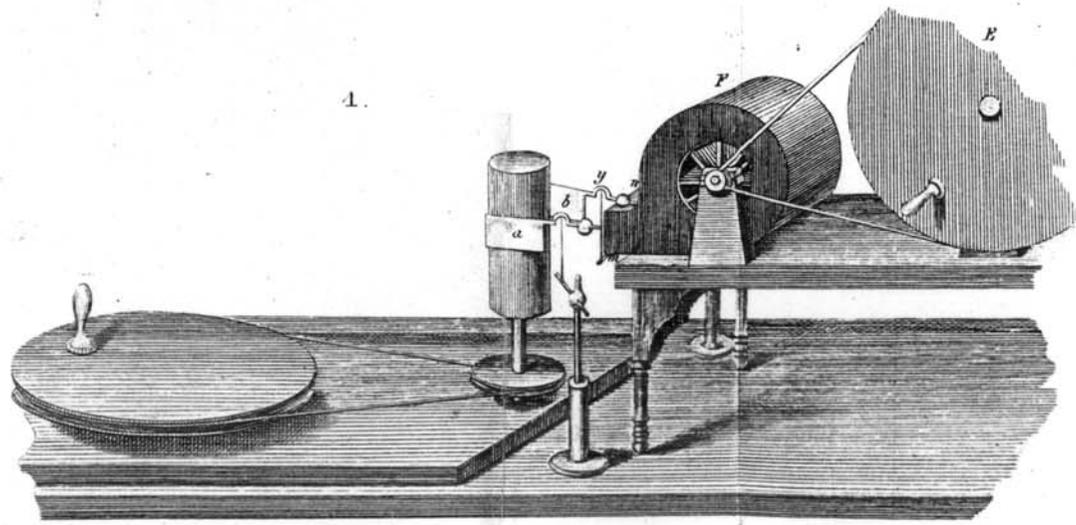
haupt auf rotirende Körper, sowohl die Himmelskörper, als auch die mit fortschreitender Bewegung auf der Erde rotirenden Körper ausübt.

II. *Zur Theorie des Sehens; von Dr. Fliedner in Hanau.*

In einem früheren Aufsatz im Band 85, Heft 3, dieser Annalen, habe ich

- a) auf die Strahlenform der Sterne und überhaupt heller oder dunkler Punkte, welche auf dunklerem oder hellerem Grunde projicirt erscheinen, aufmerksam gemacht (No. 1 bis 5), sowie den Zusammenhang dieser Strahlenform mit den »Zerstreuungsfransen« nachgewiesen, womit die meisten Augen die auf hellerem oder dunklerem Grunde projicirten Gegenstände umgeben sehen (No. 6 bis 9),
- b) gewisse Erscheinungen beschrieben und durch Zeichnungen erläutert, welche darin ihren Grund haben, daß das Netzhautbild eines jenseits oder diesseits der deutlichen Sehweite befindlichen Gegenstandes nicht genau mit dem Schatten, den er im Auge wirft, zusammenfällt (No. 10 bis 16), und daraus ein Mittel abgeleitet, das Vorhandensein einer Zerstreuungsfranse der Ferne oder der Nähe leichter zu erkennen und sie von einander zu unterscheiden (No. 17 u. 18),
- c) mittelst der »Durchmesserscheibe« nachgewiesen, daß jedes Auge in einem bestimmten Querschnitt eine kürzere, in dem darauf senkrechten eine größere Brennweite hat, als in den übrigen Querschnitten¹⁾, und

1) In No. 24, Zeile 6, jenes Aufsatzes hätte ich besser gesagt: Indem sie nämlich zeigt, daß das Auge in einem Theil seiner Querschnitte eine kürzere, im andern eine längere Brennweite hat, als u. s. w. und das



Ann. d. Phys. u. Chem. Bd. 33. St. 1.

Guinand sc.