

Der Apparat wurde mit der größten Sorgfalt mit einer Geißler'schen Quecksilberpumpe durch oftmaliges Einlassen trockener Luft getrocknet, durch stundenlanges Pumpen so gut wie möglich evacuirt und dann durch den Hahn *k* abgesperrt.

Einer energischen Strahlung ausgesetzt, geräth das Radiometerkreuz mit der an ihm befestigten unteren Glimmerscheibe in schnelle Rotation.

Allmählich kommt sodann auch die obere Scheibe in gleichem Sinne in Rotation, doch rotirt dieselbe stets, wie nothwendig, langsamer als in die untere.

Die Uebertragung der Rotation von der untern Scheibe an die obere geschieht lediglich durch die Reibung der geringen Gasmenge, welche sich in dem möglichst gut evacuirten Raum befindet.

Beleuchtet man durch eine Magnesiumlampe, die, wie es gewöhnlich der Fall ist, mit einem größeren Reflector versehen ist, so kann man das Bild des Apparates mit einer Linse in beträchtlicher GröÙe auf einen Schirm projiciren und so die Reibung in einem sehr verdünnten Gas einem großen Auditorium demonstrieren.

III. *Ueber das Radiometer von Crookes; von R. Finkener.*

Die zunächst beschriebenen Versuche haben den Zweck, festzustellen, welchen Einfluß die Veränderung des Gases, des Druckes und der strahlenden Wärme auf die Drehung eines Radiometers ausüben. Einige beobachtete Erscheinungen sind schon bekannt, aber der Vollständigkeit halber auch hier aufgeführt.

Verhalten des Radiometers in verdünnten Gasen.

§. 1. Das vorerst benutzte Radiometer hat die bekannte Form, der Durchmesser der Kugel beträgt etwa 61^{mm} , die Aluminiumarme des Kreuzes sind vom Mittelpunkt an gerechnet 11^{mm} lang, und die auf einer Seite beruhten Glimmerblättchen, Quadrate von 12^{mm} Seite, sind so daran befestigt, daß die eine Diagonale in der Verlängerung der Kreuzarme und die andere mit der Drehungsaxe in einer Ebene liegt. Die Spitzen der Flügel sind demnach etwa $2,5^{\text{mm}}$ von der inneren Glasfläche entfernt. Das Gewicht des Rades mag 100 Milligramm betragen. Oben und unten läuft das Gefäß in 6^{mm} weite Glasröhren aus, so daß man Gas durchleiten kann. Zunächst war das untere Ende zugeschmolzen und das obere mit einer Glasröhre mit Schliff verschmolzen zum Verbinden mit einer Quecksilberluftpumpe, so daß die das Kreuz tragende Nadel alsdann senkrecht stand.

Die Construction der Pumpe gestattet, das in das Hauptgefäß übergetretene Gas in eine vorher mit Quecksilber gefüllt gewesene Kugel austreten zu lassen, und ermöglicht es, bei anderer Hahnstellung noch ein zweites Gefäß auszupumpen, so daß man das Radiometer entleeren und dann mit dem im zweiten Gefäß befindlichen Gase füllen kann.

Zum Trocknen der Gase wurde Phosphorsäureanhydrid (dasselbe darf beim Uebergießen mit Wasser nicht riechen) benutzt. Als Quelle für strahlende Wärme diente ein gewöhnlicher Schwalbenschwanzbrenner, dessen Flammenfläche senkrecht zur Verbindungslinie mit dem Mittelpunkt stand und mit diesem in einer Horizontalebene war. Der bei jeder Beobachtung angegebene Druck ist aus einem am Manometer abgelesenen größeren Druck berechnet unter der Voraussetzung, daß bei angemessenem Warten nach jedem Pumpenzug der Druck in geometrischer Reihe abnehme.

Radiometer gefüllt mit Luft.

Entfernung der Flamme von dem Centrum des Radiometers	Druck des Gases in Millimetern Quecksilber	Anzahl der Drehungen in 1 Minute
100	3,66	2
100	1,05	10
300	1,05	1,2
300	0,30	6,25
300	0,09	18
500	0,09	6,25
500	0,025	11,5
700	0,025	4,75
100	0,025	170 ¹⁾
1000	0,025	2
1000	Ein weiterer Pumpenzug	2,5
1000	"	1,5
1000	"	1,1
1000	"	0,75
1000	"	0,85

Radiometer gefüllt mit Wasserstoff.

100	9	1,2
100	2,6	10,5
300	2,6	0,7
300	0,74	6,0
800	0,30	0,8
800	0,09	5
800	0,025	7,5
800	Ein weiterer Pumpenzug	6
800	"	3,5
800	"	2,5
800	"	2,5
800	"	2,5
100	—	über 200 ²⁾

- 1) Erreicht schnell das Maximum der Geschwindigkeit, kommt nach Entfernung der Flamme in 40 Sekunden zum Stehen und dreht sich dann 4 Minuten lang rückwärts.
- 2) Erreicht schnell (in etwa 2 Minuten) das Maximum der Geschwindigkeit, kommt nach Entfernung der Flamme in 90 Sekunden zum Stehen und dreht sich kaum rückwärts.

Radiometer gefüllt mit Kohlensäure.

Entfernung der Flamme von dem Centrum des Radiometers	Druck des Gases in Millimetern Quecksilber	Anzahl der Drehungen in 1 Minute
100	3,66	0,75
100	1,05	6,75
300	1,05	steht
300	0,30	3,3
300	0,09	11
500	0,09	3,5
500	0,025	8,3
700	0,025	3,7
100	0,025	132 1)
700	Ein weiterer Pumpenzug	4,7
1000	—	1,1
1000	Ein weiterer Pumpenzug	1,5
1000	"	1,5
1000	"	1,2
1000	"	1,2

§. 2. Aus einer Vergleichung der betreffenden Zahlen ergibt sich Folgendes:

- 1) Bei nicht zu weit getriebener Verdünnung findet bei gleicher Erwärmung eine bestimmte Bewegung des Radiometers in einem specifisch leichteren Gase schon bei größerem Druck statt, als in einem schwereren Gase.
 - 2) Das Drehungsmoment, welches durch die Flamme auf das Radiometer ausgeübt wird, wächst unter übrigen gleichen Umständen zunächst mit der Verdünnung der Gase, nimmt aber bei noch weiterer Verdünnung wieder ab.
 - 3) Dieses Maximum tritt bei Wasserstoff schon bei größerem Druck ein, als bei Luft und Kohlensäure.
- 1) Erreicht schnell das Maximum der Geschwindigkeit, kommt nach Entfernung der Flamme in 40 Secunden zum Stehen und dreht sich dann 5 Minuten lang lebhaft rückwärts.

bis 200°, das metallische Kupfer absorbiert Sauerstoff ziemlich lebhaft bei 220°, es bildet sich zuerst oberflächlich schwarzes Oxyd, welches bei längerem, stärkerem Erhitzen in rothes Oxydul übergeht. Die Kalkerde absorbiert langsam Wasserdampf, und das Capillarrohr beschränkte bei durchgehendem Sauerstoffstrom das Diffundiren von Gasen aus der Pumpe in das Radiometer auf ein Minimum. Es war so eng, daß bei starker Verdünnung die Ausgleichung des Druckes nach einem neuen Pumpenzug in einer Stunde noch nicht beendet war.

Bei vorläufigen Versuchen traten Erscheinungen auf, als wenn auch nach längerem Ausspülen mit Sauerstoff bei großer Verdünnung noch andere Gase an der Oberfläche des Glases und der Substanzen haften geblieben wären, die allmählich und zwar schneller beim Erwärmen sich löslösten. Demnach wurde wie folgt verfahren. Nach dem Auspumpen wurde das Kölbchen *a* in eine leicht schmelzbare Legirung getaucht und kurze Zeit bis 200° erwärmt. Ueber die Zunahme des Druckes in dem Radiometer giebt die eintretende Veränderung in der Bewegung desselben Auskunft; durch Abkühlen der Legirung bis gegen 140° kann man die Entwicklung von Sauerstoff inhibiren, oder doch äußerst gering machen. Während dessen wurde der ganze Apparat dann und wann vorsichtig erwärmt, und das in die Pumpe übergetretene Gas zuweilen entfernt. Nach einer Stunde wurde der Druck im Radiometer bis auf 1^{mm} gesteigert, die Entwicklung von Sauerstoff sodann unterbrochen, und der dem Radiometer benachbarte Hahn der Pumpe geschlossen, nachdem der Druck wieder bis auf 0,1^{mm} gesunken war. Einige Stunden später wurde das Kupfer in die Legirung getaucht und $\frac{1}{2}$ Stunde lang bis 220° erhitzt. An den folgenden Tagen wurden dieselben Operationen mit dem Apparate vorgenommen, nur blieb das Radiometer längere Zeit bei 0,1^{mm} Druck mit Sauerstoff gefüllt. Als nach mehreren Tagen das Radiometer nach dem Erhitzen des Kupfers

keine Abweichung von dem Verhalten am vorigen Tage zeigte, wurde Sauerstoff entwickelt und die Capillarröhre, während ein lebhafter Gasstrom durchging, nahe der Pumpe abgeschmolzen. Das Radiometer zeigte nun beim Erhitzen des metallischen Kupfers auf 220° folgendes Verhalten:

Verflossene Zeit vom Anfang des Erhitzens an, in Minuten	Anzahl der Dre- hungen in 1 Minute	Entfernung der Flamme in Millimetern
0	3	400
10	9	"
15	25	"
17	25	"
20	22	"
30	15	"
50	8	"
55	8	" 1)
65	steht	"
70	11	300
80	steht	"
90	steht	250
90	25	200
100	26	200

Näherte man die Flamme bis auf 100^{mm} dem ruhenden Radiometer, so setzte es sich langsam in Bewegung; die Schnelligkeit derselben steigerte sich mit der Zeit, erst nach Verlauf von 15 Minuten zeigte sich kein Wachsen mehr; es mochten dann 300 Drehungen in einer Minute erfolgen. Nach dem Auslöschen der Flamme nahm die Bewegung langsam ab und nach 13 Minuten trat Stillstand ein. Dies Verhalten wurde im Laufe desselben Tages wiederholt beobachtet; drei Wochen später fand sich aber in dem Radiometer so viel Gas, daß es sich auch bei ganz naher Flamme nicht drehte, auch nicht beim Entwickeln von Sauerstoff und bei dem darauf folgenden Erhitzen des Kupfers. Eine äußere Veranlassung zum Ein-

1) Der Kalk, welcher in Folge des Erhitzens der Legirung warm geworden war, wurde abgekühlt.

treten von Luft war nicht zu ermitteln und ein Sprung im Glase nicht wahrzunehmen. Ich nehme aber doch an, daß an einer der Verschmelzungsstellen eine kleine Oeffnung vorhanden gewesen ist, und hoffe, bei einem wiederholten Versuche eine größere Verdünnung des Gases zu erreichen.

Die durch die Versuche nachgewiesene Abnahme des Drehungsmomentes bei weiterer Verdünnung beträgt wenigstens 95 Proc. des Maximums desselben, und es spricht keine beobachtete Thatsache gegen die Annahme, daß bei fortgesetzter Verdünnung eine beliebige Verkleinerung zu erreichen sey. Die strahlende Wärme wirkt nicht direct abstoßend auf die beruften Flügel, so daß dadurch die Drehung zu Stande käme; sie bedarf eines Gases zum Uebertragen der Wirkung.

Erklärung der Bewegung.

§. 4. Um zu einer Vorstellung von dieser Uebertragung zu gelangen, denken wir uns das Gas constituirt nach der neueren Gastheorie und sehen zunächst von der Einwirkung der Schwere ab. Wir verdünnen das Gas so weit, daß der Weg, den ein Molecül zwischen zwei Zusammenstößen mit anderen Molecülen durchschnittlich zurücklegt, sehr groß ist im Verhältniß zu den Dimensionen der Kugel des Radiometers. Jede Flächeneinheit der Oberfläche oder der Flügel wird in diesem Fall gleich oft von Molecülen getroffen. Ist der Druck des Gases in dem Raum p , die Temperatur desselben t und die Temperaturdifferenz zwischen der beruften und nicht beruften Flügelseite Δt , so wird die Flächeneinheit der beruften Seite, da die von ihr abfliegenden Molecüle die der höheren Temperatur entsprechende größere Geschwindigkeit haben, einen Ueberdruck P erleiden, so daß

$$P = \frac{1}{2} p \frac{\Delta t}{273 + t}.$$

Die größere Geschwindigkeit, mit der ein Molecül den Weg von der Fläche zur Wand zurücklegt, hat auf

die übrigen Molecüle keinen directen Einfluß, und einen indirecten nur dadurch, daß sie so wirkt, als ob die Anzahl der in dem Raum überhaupt vorhandenen Molecüle vergrößert würde.

§. 5. Finden in Folge weniger starker Verdünnung wieder Zusammenstöße statt zwischen zwei Molecülen mit verschiedener Geschwindigkeit, so werden dadurch die Richtungen der zum gemeinsamen Schwerpunkt relativen Geschwindigkeiten geändert, und zwar nach Art der Einwirkung der Molecüle auf einander in verschiedenem Maaße; die Bewegung des Schwerpunkts bleibt immer ungeändert. Sind die Molecüle harte, vollkommen elastische Kugeln, so ist nach dem Stoß für die zum Schwerpunkt relativen Geschwindigkeiten der beiden Molecüle jede Richtung im Raum gleich wahrscheinlich. Bei einem anderen Abstoßungsgesetz ist die durchschnittliche Ablenkung weniger groß. Für den Fall, daß die Abstoßung zweier gleichen Molecüle umgekehrt proportional ist der fünften Potenz der Entfernung, hat Maxwell¹⁾ die Bahn der Molecüle berechnet. In seiner Tabelle p. 145 bezeichnet, bei ruhendem Schwerpunkt, $2a$ die stattfindende Ablenkung und $2b$ die Entfernung, in der die beiden als Punkte gedachten Molecüle ohne eine eintretende Einwirkung an einander vorbeifliegen würden. Die Geschwindigkeit ist nach beendeter Einwirkung dieselbe wie vorher. Projiciren wir die Geschwindigkeiten in den verschiedenen möglichen Richtungen nach dem Stoß auf die ursprüngliche Bahn, und nehmen die Summe der Projectionen in dem einen und andern Sinn, so giebt die Differenz derselben, getheilt durch die Anzahl der Fälle, die durchschnittliche Geschwindigkeit in der alten Richtung nach dem Stoß. Die durch den Stoß herbeigeführte Abnahme dieser Geschwindigkeit, getheilt durch die ursprüngliche, wollen wir als Maaßstab für die bei einem Stoße stattfindende Ausgleichung der verschiedenen Richtungen nehmen. Diese GröÙe ist davon abhängig, bis zu welcher Ablenkung herunter man einen

1) *Phil. Mag.* (1868) *ser.* 4, *Vol.* 35, p. 129.

erfolgten Stoß annimmt; von derselben Annahme ist aber auch die mittlere Bahnlänge abhängig, so daß das Verhältniß der Ablenkung zur mittleren Bahnlänge sich einer bestimmten Gränze rasch nähert, wenn man die Bahnlänge kleiner nimmt. Läßt man einen Stoß bei einer Ablenkung von $1^{\circ} 2'$ anfangen, so erhält man für die Ausgleichung den Werth 0,11. Bei jedem folgenden Zusammenstoße findet eine weitere Ausgleichung statt, und da der jedesmalige Betrag derselben proportional der noch auszugleichenden GröÙe ist, so

läßt sich die letztere ausdrücken durch $e^{-0,11 \frac{x}{s}}$, wenn man den vom Molecül durchlaufenen Weg, von dem Flügel an gerechnet, mit x und die mittlere Bahnlänge mit s bezeichnet.

Unter der Voraussetzung, daß die Molecüle vollkommen harte, elastische Kugeln seyen, geht der Ausdruck

$e^{-0,11 \frac{x}{s}}$ über in $e^{-\frac{x}{l}}$, so daß wir $\frac{0,11}{s} = \frac{1}{l}$ setzen können.

Der Umstand, daß der Werth von $\frac{0,11}{s}$ sich mit der Temperatur ändert, der von $\frac{1}{l}$ aber nicht, kann hier außer Betracht bleiben. Die GröÙe l soll weiterhin auch noch mittlere Wegelänge genannt werden.

§. 6. In dem Raum zwischen dem Flügel und der Wand bewegen sich die Molecüle nach der kalten Richtung hin mit größerer Geschwindigkeit als nach der warmen. Bezeichnen wir an einer Stelle die Durchschnittsgeschwindigkeit in der Richtung, in welcher dieser Unterschied am größten ist, und die als die normale bezeichnet werden soll, in dem einen Sinne mit $v + \Delta v$, in dem anderen mit $v - \Delta v$, so ist $(A + \Delta A)(v - \Delta v) = (A - \Delta A)(v + \Delta v)$, wenn $2A$ die Anzahl der an der betreffenden Stelle in der Raumeinheit enthaltenen Molecüle bezeichnet. Ist nun das Gas nicht stark verdünnt, so ist die Ausgleichung der Richtungen nahezu vollständig, und für eine Stelle, nicht zu weit von der Mitte des Flügels entfernt, ist für jede Richtung senkrecht zu der normalen der entsprechende Werth $= Av$. Denkt man sich hier senkrecht zu der

normalen Richtung eine Ebene eingeschoben, die nach der warmen Seite hin die $v - \Delta v$ und nach der kalten hin die $v + \Delta v$ entsprechende Temperatur besitzt, so wird auf beide Seiten der Ebene ein Druck nahezu proportional Δv^2 und gleich dem Druck in der darauf senkrechten Richtung ausgeübt. Der letztere ist gleich dem Druck im Gefäße, so daß kein Ueberdruck auf die Mitte des Flügels vorhanden ist.

§. 7. Um die auf den Rand stattfindende Einwirkung in Betracht zu ziehen, denken wir uns an den Flügel anschließend eine denselben fortsetzende ebene Fläche, und geben den einzelnen Stellen eine solche Temperatur, daß die Geschwindigkeit der Molecüle überall dadurch ungeändert bleibt. Mit der Entfernung vom Flügel nimmt in der Fläche die Temperatur ab, und in der Nähe der Gränze kann man die entsprechende Abnahme von v proportional der Entfernung von der Gränze setzen. Für eine Entfernung l , gleich der mittleren Wegelänge, läßt sich diese Abnahme ausdrücken durch $m(v_1 - v_0) \frac{l}{E_1}$. Sind beide Seiten der Flügel gleich warm, so ist für jede Seite der Werth von m größer als 1; ist die eine Seite wärmer, so wird für diese m dadurch größer, während es für die andere Flügelseite abnimmt. E_1 ist die Entfernung der Gränze von der Wand, und v_1 und v_0 sind die Werthe, welche v an der Gränze und an der Wand annimmt.

Die Anzahl und die Geschwindigkeit der Molecüle, welche an einer Stelle die Fläche treffen, sind von der Temperatur der Umgebung dieser Stelle abhängig, und sie sind nahezu dieselben, als wenn die Umgebung bis zur Entfernung l das Mittel der Temperaturen der einzelnen Punkte innerhalb der obigen Entfernung hätte. Für ein Element an der Gränze haben sie demnach denselben Werth, als wenn die Temperatur der Umgebung der Größe $v_1 - 0,2 m \frac{l}{E_1} (v_1 - v_0)$ entspräche. Ein Element der Fläche mit dieser Temperatur würde durch die anprallenden Molecüle den normalen Druck erleiden, ein

Element des Flügels erfährt daher einen Ueberdruck proportional dem Ausdruck $0,2 m \frac{l}{E_1} (v_1 - v_0)$.

In der Entfernung l von der Gränze hört der Ueberdruck auf. Diesen kann man annähernd umgekehrt proportional der Entfernung von der Gränze setzen, wir erhalten dann für einen Streifen von der Breite l den Ueberdruck $0,1 m \frac{l}{E_1} (v_1 - v_0)$, und daher für den ganzen Flügel, dessen Seitenlänge $= d$ ist,

$$0,4 m \frac{l}{E} \frac{l}{d} (v_1 - v_0).$$

E bezeichnet einen Mittelwerth aller E_1 , die den verschiedenen Stellen des Randes entsprechen.

Unter übrigens gleichen Umständen wächst der Ueberdruck proportional der Anzahl der Molecüle, d. h. dem Druck, und so ergibt sich, da der Gröfse $v_1 - v_0$ entspricht $\frac{1}{2} \frac{\Delta t}{273 + t}$, bei einem Druck p ein Ueberdruck auf die Flächeneinheit

$$0,2 m \frac{l^2}{Ed} p \frac{\Delta t}{273 + t}.$$

Wenn beide Seiten der Flügel verschieden stark erwärmt sind, so läßt sich die Differenz der obigen Gröfse für die beiden Seiten, d. h. der bewegende Druck, ausdrücken durch:

$$0,2 \mu \frac{l^2}{Ed} p \frac{\delta t}{273 + t},$$

wenn δt den Temperaturunterschied der beiden Flügel-seiten und μ einen Factor bezeichnet, der gröfser ist als 1 und zunimmt mit dem Unterschied, der zwischen der Temperatur der Wandung und der Mittel-Temperatur der Flügel-seiten besteht.

§. 8. Wird das Gas dünner, so daß die Ausgleichung der Richtungen nicht vollständig ist, so ist die zu der normalen Richtung senkrechte Geschwindigkeit kleiner als das Mittel aus den Geschwindigkeiten in der normalen Richtung; der Druck in der letzteren ist daher gröfser, und es findet ein Ueberdruck auf die Mitte des Flügels

statt. Derselbe ist proportional der nicht stattgefundenen

Ausgleichung der Richtungen, der GröÙe $e^{-\frac{R_1}{l}}$, wo R_1 einen Mittelwerth der Längen bezeichnet, welche die von dem Mittelpunkt des Flügels nach den verschiedenen Stellen der Wände des Gefäßes gezogenen Graden besitzen.

Für die Stellen des Flügels näher dem Rande gelegen und auch für den Mittelpunkt, sobald das Gas so dünn wird, daß der Durchmesser der Flügel nur ein kleines Vielfaches der mittleren Wegelänge beträgt, kommt aber noch ein anderer Umstand in Betracht. Die Molecüle mit der größeren Geschwindigkeit gehen im Ganzen radialförmig von der Fläche aus, so daß die Anzahl Stöße, an denen ein Molecül mit größerer Geschwindigkeit Theil nimmt, einen um so geringeren Bruchtheil der in einer Raumeinheit erfolgenden Stöße ausmacht, je weiter diese Stelle von der Fläche entfernt ist. Der Einfluß, welchen diese Stöße auf die zur normalen senkrechte Durchschnittsgeschwindigkeit ausüben, nimmt daher mit der Entfernung ab. Ziehen wir den auf den ganzen Flügel ausgeübten Ueberdruck in Betracht, so haben wir in dem

obigen Ausdruck $e^{-\frac{R_1}{l}}$ zunächst statt des R_1 einen Mittelwerth für die verschiedenen Stellen des Flügels zu setzen und dann denselben mit einem Factor $\varphi(l)$ zu multipliciren, der für kleinere Werthe von l gleich 1, mit

l wächst und wieder bis 1 abnimmt, so daß $\varphi(l) e^{-\frac{R}{l}}$ mit wachsendem l fortwährend zunimmt. Für sehr große

Werthe von l wird wie $\varphi(l)$ so auch $e^{-\frac{R}{l}} = 1$, und der bei einem Druck p auf die Flächeneinheit einer Flügel-seite stattfindende Ueberdruck ist daher:

$$\frac{1}{2} p \varphi(l) e^{-\frac{R}{l}} \frac{\Delta t}{273 + t}.$$

Die Differenz dieses Ausdrucks für die beiden Flügel-seiten giebt den bewegenden Druck

$$= \frac{1}{2} p \varphi(l) e^{-\frac{\kappa}{T} \frac{\delta t}{273 + t}}.$$

§. 9. Bisher waren die Molecüle dem Einfluß der Schwere entzogen, lassen wir jetzt diese Einschränkung fallen. In Folge der größeren Erwärmung würde der Druck vor der erwärmten Fläche nach unten hin langsamer zunehmen als an anderen Stellen, wenn keine neue Bewegung des Gases einträte. Der dadurch entstehende Minderdruck, welcher proportional dem vorhandenen Druck seyn würde, wird aber zum Theil ausgeglichen durch das Auftreten eines Gasstromes, der sich vor den Flügeln aufwärts bewegt mit einer Geschwindigkeit, die von der Verdünnung unabhängig ist und bestimmt wird durch die stattfindenden Temperaturdifferenzen. Die Zunahme der Geschwindigkeit ist parallel der Flügelfläche und ändert so die darauf senkrechte Componente nicht; der Weg, den ein Molecül allein in Folge des Geschwindigkeitszuwachses in der Zeit zurücklegt, während welcher es eine Strecke gleich der mittleren Wegelänge durchfliegt, ist sehr klein im Verhältniß zu den Dimensionen des Radiometers. Es wirkt daher erstens die so mäßige, fortschreitende Bewegung des Gases auf den aus der Agitationsgeschwindigkeit hergeleiteten Ueberdruck nicht wesentlich ändernd ein.

Zweitens. Nehmen wir an, ein Gasstrom bewege sich vor einer Fläche hin ohne Reibung, so wird, wenn die Fläche gleiche Temperatur mit dem Gase hat, keine Aenderung des zur Fläche senkrechten Drucks stattfinden, da dieselbe in der Zeiteinheit von der gleichen Anzahl Molecüle mit derselben zu ihr senkrechten Geschwindigkeit getroffen wird, als wenn das Gas ruhte. Die Fläche sey jetzt erwärmt, sie habe in der Richtung des Gasstromes eine mehrfach kleinere Dimension als die mittlere Wegelänge der Molecüle, und die Geschwindigkeit des Gasstromes sey größer, als die Agitationsgeschwindigkeit der Molecüle. Die Fläche wird dann von nahezu derselben Anzahl Molecüle getroffen, als wenn sie nicht

erwärmt wäre. Es wird nach dem Vorhergehenden ein Ueberdruck eintreten $= \frac{1}{2}p \frac{\Delta t}{273+t}$. Dehnen wir die Fläche in der Richtung des Gasstroms aus, so wird für den alten Theil Nichts geändert. In größerer Entfernung von demselben stellt sich aber ein Zustand des Gases her, der sich von dem früher (§. 6) beschriebenen nur dadurch unterscheidet, daß alle Molecüle einen gleichen Zuwachs an Geschwindigkeit in der Richtung des Gasstroms erhalten haben; es findet also hier kein Ueberdruck statt.

Lassen wir jetzt die Geschwindigkeit des Gasstroms abnehmen, so nimmt nahezu in demselben Verhältniß ab: erstens der Inhalt der Fläche, welcher von Molecülen mit anderer Geschwindigkeit getroffen wird, als wenn das Gas ruhte; zweitens die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Molecülen, welche die Fläche nur in Folge des Stromes treffen und denen, welche ohne Strom die Fläche an denselben Stellen getroffen haben würden. Diese beiden Größen sind ferner annähernd proportional der Weglänge der Molecüle. Der Ueberdruck ist demnach umgekehrt proportional dem Quadrate der Stromgeschwindigkeit, und proportional dem Quadrate der mittleren Weglänge. Bei einem Druck p ist also der Ueberdruck

$$= \frac{1}{2}p \left(\frac{l}{l_0}\right)^2 \left(\frac{v_0}{v}\right)^2 \frac{\Delta t}{273+t}.$$

Bei den in dem Radiometer vorhandenen Zuständen kann die Geschwindigkeit des aufsteigenden Stromes über 0,1 Meter nicht wohl hinausgehen, so daß $\frac{v_0}{v}$ etwa $\frac{1}{5000}$ ist. Die GröÙe pl ist constant für Luft etwa $\frac{1}{15}$, l_0 ist nach den Dimensionen des Radiometers sicher nicht kleiner als 10^{mm} und l kann nicht größer als 20^{mm} werden. Setzen wir endlich $\Delta t = 10'$ und $t = 27^\circ$, so erhalten wir als Maximum des obigen Ausdrucks $\frac{1}{1125 \cdot 10^8}$, oder ausgedrückt in Milligramm auf 1^{cm} Fläche $\frac{1,2}{10^8}$, eine GröÙe, welche ihrer Kleinheit wegen zu vernachlässigen ist.

Findet Reibung an dem Flügel statt, so geht dadurch die Stromgeschwindigkeit eines den Flügel treffenden Molecüls mehr oder weniger verloren, während die zur Fläche senkrechte Componente nicht geändert wird. Es findet, verglichen mit der Bewegung ohne Reibung, ein Aufstauen des Gasstromes statt und so eine Vergrößerung des Druckes, die von oben nach unten annähernd gleichmäßig zunimmt. Da aber unten ein Minderdruck stattfindet, so kann durch die Reibung im Durchschnitt für die ganze Fläche kein Ueberdruck herbeigeführt werden.

§. 10. Das Resultat der Erörterung ist demnach, daß bei unverdünntem Gase ein Minderdruck auf die berufte Seite stattfinden kann, und daß bei Verdünnung ein Ueberdruck auf die berufte Seite eintritt, der, auf die Flächeneinheit bezogen, bis zu einem gewissen Grade der Verdünnung gleich ist:

$$0,2 \mu \frac{l^2}{E d} p \frac{\delta t}{273 + t},$$

und der bei sehr weit getriebener Verdünnung dargestellt wird durch:

$$\frac{1}{2} \varphi(l) p e^{-\frac{R}{l}} \frac{\delta t}{273 + t},$$

Sehen wir jetzt, in wie weit hiermit die beobachteten Erscheinungen übereinstimmen.

Beide Ausdrücke wachsen mit l , was der leichteren Beweglichkeit des Radiometers in einem specifisch leichteren Gase entspricht; sie wachsen mit abnehmendem p , und zwar erhält der zweite Ausdruck, wenn man $\varphi(l)$ als constant betrachtet, den Maximalwerth, wenn $\frac{R}{l} = 1$ wird. Für Luft bei $p = 760^{\text{mm}}$ ist $l = \frac{1}{11000}^{\text{mm}}$, und nach den Dimensionen des Radiometers kann man R auf etwa 10^{mm} schätzen. Das Maximum tritt daher bei einer 110000-fachen Verdünnung ein, für $p = 0,007$; beobachtet ist dasselbe nach §. 1 bei 0,007, und in einem besonders zu diesem Zweck angestellten Versuch bei etwa 0,010.

Was die Größe des Maximalwerthes anbetrifft, so er-

hält man für eine Temperaturdifferenz von $\frac{1}{160}$ Grad bei 20° , wenn man $q(l) = 1$ setzt, den Ueberdruck

$$\frac{1}{2} \cdot 0,01 \frac{0,01}{273 + 20} e^{-1} = \frac{1}{1600} \cdot \frac{1}{10000},$$

auf 6 □Cm. Fläche also einen Druck von

$$6 \cdot \frac{1360}{1600} \cdot \frac{1}{10000} = \frac{1}{2000} \text{ Mgr.}$$

An einer guten Waage wird eine Masse von 300^{grm} durch ein 70^{mm} weit von der Drehungsaxe angebrachtes Uebergewicht von $\frac{1}{10}$ ^{grm} in Bewegung gesetzt, eine Masse von 0,100^{grm} würde demnach durch ein 20^{mm} weit entferntes Uebergewicht von $\frac{1}{3000} \cdot 0,1 \cdot \frac{7}{2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2000}$ Mgr. in Bewegung gesetzt werden können.

Für den größten Druck $p = 3,66$ ^{mm} giebt der erste Ausdruck, wenn man $E = 10$ ^{mm} und $\mu = 2$ setzt, was sicher nicht zu hoch ist, und annimmt, daß die Gröfse δt umgekehrt proportional ist dem Quadrate der Entfernung der Flamme, den bewegenden Druck $= \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2000}$ Mgr..

Folgerungen aus der gegebenen Erklärung der Bewegung.

§. 11. Da die den Ueberdruck darstellenden Ausdrücke mit abnehmendem E und R wachsen, so muß die Drehung unter übrigens gleichen Umständen mit der Entfernung der Flügel von der Wand abnehmen.

Auf einer Seite beruhte Aluminiumflügel, Quadrate von 12^{mm} Seite, wurden angehängt an ein Drehkreuz, welches auf einer in einem Dreifuß aus Glas eingeschmolzenen Nadel ruhte. Die Seiten der Quadrate waren horizontal resp. senkrecht, und die weiteste Entfernung von Seite zu Seite betrug 54^{mm}. Dieses Rad wurde nach einander unter Cylinder von verschiedener Weite, die auf einem Luftpumpenteller aufgeschliffen waren, aufgestellt, und es wurden die beim Verdünnen der Luft eintretenden Drehungen beobachtet. Zur Entfernung des Wasser-

dampfes befand sich in dem Cylinder ein mit Phosphorsäureanhydrid gefülltes Schälchen.

Entfernung der Flamme vom Centrum	Druck des Gases in Millimetern Quecksilber	Dauer einer Drehung in Secunden	Innerer Durchmesser des Cylinders
132 ^{mm}	0,42	55	{ 64 ^{mm}
"	0,70 *)	12	
"	0,39	65	{ 79 ^{mm}
"	0,09 *)	16	

Der mit *) bezeichnete Druck ist bestimmt aus der Luft welche in die große Kugel der Pumpe übergetreten war und nach Ueberführung in eine enge Maaßröhre gemessen wurde. Vor dem Messen wurde die drückende Quecksilbersäule nahezu gleich gemacht der Länge der zu messenden Luftsäule. Wenn die Aufstellung unter dem Cylinder nicht centrisch ist, so treten Verschiedenheiten in der Drehung ein, je nach der Richtung, in welcher die Flamme um den Cylinder aufgestellt wird. Die hier angegebenen Zahlen sind das Mittel aus 4 Beobachtungen, bei denen diese Richtung jedes Mal um 90° geändert wurde.

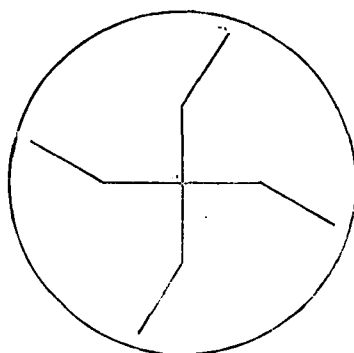
§. 12. Der Einfluß der Entfernung der Glaswand läßt sich auch auf eine andere Art nachweisen. An einem Drehkreuz wurden die auf beiden Seiten gleich beschaffenen Flügel, Quadrate von 13^{mm} Seite, um die der Drehaxe nächste parallele Kante um etwa 30° gedreht. Es kamen dadurch die Flächen in eine Ebene, die parallel der Drehaxe war, aber von derselben etwa 7^{mm} entfernt blieb. Fig. 2 stellt den horizontalen Querschnitt dar. Der bewegende Druck auf die Flächeneinheit ist hier:

$$0,2 m \frac{l^2}{d} p \frac{At}{273 + t} \left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E_1} \right),$$

und bei sehr starker Verdünnung:

$$\frac{1}{2} p \frac{At}{273 + t} \left(\varphi(l) e^{-\frac{R}{l}} - \varphi_1(l) e^{-\frac{R_1}{l}} \right).$$

Figur 2.



E und R sind mittlere Entfernungen von der Wandung für die derselben nächste Seite der Flügel, E_1 und R_1 die entsprechenden Größen für die andere Seite.

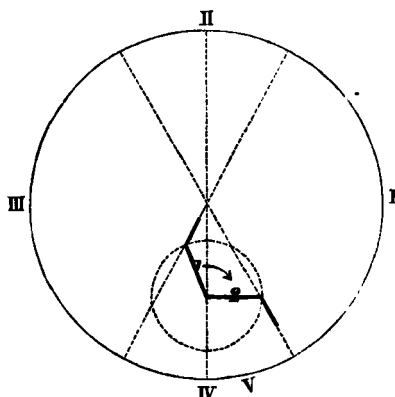
Die Beobachtung eines solchen Rades von 52^{mm} Durchmesser unter einem Cylinder von 64^{mm} Durchmesser gab folgende Zahlen:

Entfernung der Flamme vom Centrum	Druck des Gases in Millimeter Quecksilber	Dauer einer Drehung in Secunden
132 ^{mm}	0,51	35
"	0,25	17
"	0,07	5,5
"	0,02	3
in der Sonne	0,001	1

§. 13. Die Einwirkung der Wandung macht sich geltend bei einer excentrischen Stellung des Drehkreuzes im Cylinder, worauf schon oben aufmerksam gemacht wurde.

In Fig. 3 ist der größere Kreis der horizontale Schnitt einer Luftpumpenglocke, der kleinere die Bahn der der Drehaxe nächsten Flügelkante. Aus der Zeichnung ist leicht zu entnehmen, daß in den Stellungen, welche ein Flügel einnimmt, während ein Kreuzarm sich aus der Stellung 1 nach 2 bewegt, diejenige Flügelseite, welche mit dem Arm den concaven Winkel bildet, der Wandung

Figur 3.



näher ist, als die andere; für die weitere Drehung aus Stellung 2 nach 1 kehrt sich das Verhältniß um. Das Drehungsmoment der in dem concaven Winkel befindlichen Flügel ist entgegengesetzt dem der Flügel in dem convexen Winkel. Wenn nun der letztere auch größer ist, so kann das doch compensirt werden, wenn man in der Nähe der Glocke in der Richtung I die Flamme aufstellt, da dann die Flügel in dem concaven Winkel bei der geringeren Entfernung von der Flamme stärker erwärmt werden, als die in dem convexen Winkel.

Bei einem ausgeführten Versuch war der innere Halbmesser der Glocke 85^{mm} , und ein Drehkreuz von 56^{mm} Durchmesser war 33^{mm} weit vom Centrum derselben aufgestellt. Um schon bei größerem Druck das vorgesteckte Ziel zu erreichen, wurde die Glocke mit Wasserstoffgas gefüllt. Bei demselben Druck wurde die Flamme nach einander in die mit I, II, III, IV bezeichneten Stellungen gebracht, so daß sie in jeder 300^{mm} vom Centrum des Drehkreuzes entfernt war; sie blieb jedes Mal so lange stehen, bis eine Aenderung in der Drehung nicht mehr wahrzunehmen war. Es tritt dieser Punkt wieder ein, sobald die Temperatur der Glocke bei der neuen Stellung der Flamme constant geworden ist.

Druck in Millimeter Quecksilber	Dauer der Drehung bei den verschiedenen Stellungen der Flammen in Secunden			
	I	II	III	IV
0,8	steht	steht	rechts 24	steht
0,1	"	"	rechts 10	"
0,012	links 20	"	rechts 2	rechts 40
0,001	links 30	rechts 8	rechts 3	rechts 12

Diese Drehung in verschiedenem Sinne nach der Stellung der Flamme tritt leichter ein, wenn die Flügel weniger gedreht sind und die inneren Seiten derselben berührt werden. In einem solchen Fall hat sich noch eine andere Erscheinung bemerklich gemacht. Da bei der Flammenstellung IV ein Rechtsdrehen und bei I ein Linksdrehen erfolgt, so giebt es eine Zwischenstellung, bei der keine Bewegung eintritt. Sucht man durch Probiren diese Ruhestellung auf, so zeigt sich, daß dieselbe bei stärkerem Verdünnen weiter nach I rückt. Wird die Flamme von Anfang an in eine Lage zwischen den äußersten Punkten der Ruhestellung gebracht, so tritt beim Auspumpen zuerst Rechtsdrehen, dann Stillstand und schließlich Linksdrehen ein. Diese Erscheinung kann davon herrühren, daß die Reibung mit der Verdünnung abnimmt. Von der näheren Glaswand her werden die Flügel von einer größeren Anzahl Moleculé getroffen, als von der entgegengesetzten. Wird nun die den Flügeln parallele Componente beim Anprall mehr oder weniger vollständig aufgehoben so entsteht dadurch ein Drehungsmoment nach rechts. Nimmt bei sehr starker Verdünnung diese Aufhebung ab, findet mehr Gleitung statt, so wird das Drehungsmoment nach rechts verringert und es kann das nach links überwiegend werden.

Zum Versuch wurde ein Cylinder von 78^{mm} Durchmesser und ein Rad ähnlich dem vorigen benutzt, nur waren die inneren Flügelseiten beruht. Die Drehungsaxe war etwa 5^{mm} vom Centrum des Cylinders entfernt, und die Flamme wurde in eine Stellung ähnlich der Lage V Fig. 3 gebracht. Der leichten Beweglichkeit halber wurde Wasserstoff angewendet. Der Factor für die Verdünnung durch einen Pumpenzug war $\frac{1}{1,78}$.

Entfernung der Flamme vom Centrum	Druck des Gases in Millimeter Quecksilber	Dauer einer Drehung in Secunden
250 ^{mm}	0,05	rechts 4
"	0,01	rechts 10
"	nach 3 Zügen	steht
"	nach 4 Zügen	links 10

§. 14. Denkt man sich ein Rad wie das zuletzt angewendete centrisch unter einem Cylinder aufgestellt, so ist für sehr starke Verdünnung der Druck auf die Flächeneinheit der Flügel

$$= \frac{1}{2} p \frac{1}{273 + t} \left\{ \varphi(l) e^{-\frac{R}{l}} \Delta t - \varphi_1(l) e^{-\frac{R_1}{l}} \Delta t_1 \right\}.$$

Der Werth von $e^{-\frac{R}{l}}$ übertrifft den von $e^{-\frac{R_1}{l}}$, so lange l noch mehrfach kleiner als R ist, in solchem Maasse, daß das erste Glied überwiegt, wird aber l sehr groß, so werden $\varphi(l) e^{-\frac{R}{l}}$ und $\varphi_1(l) e^{-\frac{R_1}{l}}$ nach dem, was bei der Herleitung dieser Ausdrücke darüber gesagt ist, nahezu gleich, und es überwiegt dann das zweite Glied, weil Δt_1 , welches sich auf die beruhte Fläche bezieht, größer

ist als *At*. Es kann daher eine Umkehr der Drehung eintreten, so daß schliesslich dieselbe im Sinne der berufensten Seite stattfindet. Eine solche Umkehr habe ich nicht nachweisen können. Es kann das an dem Einfluß der Reibung liegen, mag aber gelingen, wenn statt der Aluminiumflügel Glimmerblättchen genommen werden, da bei diesen der Temperaturunterschied der beiden Seiten gröfser seyn wird.

§. 15. Nach §. 7 kommt die Bewegung, so lange das Gas mäfsig verdünnt ist, durch eine auf die Ränder der Flügel ausgeübte Einwirkung zu Stande. Es muß darnach die Bewegung leichter stattfinden, wenn statt der vollen Flügel durchbrochene angewendet werden.

Von 8 gleich beschaffenen Aluminiumblättchen wurden aus 4 je vier Rechtecke von 1^{mm} Breite und 9^{mm} Länge ausgeschnitten, sie wurden dann sämmtlich an einem Rande umbogen, so daß sie an einem Drehkreuz, die durchbrochenen mit der langen Seite der Ausschnitte senkrecht, aufgehängt werden konnten, und auf einer Seite möglichst gleichmäfsig beruht. Die Flügel bildeten Quadrate von 13^{mm} Seite, der Durchmesser des Rades betrug 54^{mm} und das Gewicht desselben mit vollen Flügeln 0,150^{grm} mit leeren 0,135^{grm}. Beim Anhängen der Flügel wurde darauf gesehen, daß Lage und Entfernung derselben in beiden Fällen gleich war, und die Aufstellung unter einem Cylinder von 63^{mm} Durchmesser war möglichst centrisch.

Rad mit vollen Flügeln.

Entfernung der Flamme vom Centrum	Druck des Gases in Millimeter Quecksilber	Dauer einer Drehung in Secunden
132 ^{mm}	0,42	40
"	0,11	9
"	0,03	4
"	0,01	3,8

Rad mit durchbrochenen Flügeln.

Entfernung der Flamme vom Centrum	Druck des Gases in Millimeter Quecksilber	Dauer einer Drehung in Secunden
132 ^{mm}	0,84	44
"	0,42	21
"	0,03	3,3
"	0,01	3,4

Der Unterschied in der Drehung in dem einen und andern Fall ist derartig, daß die Abnahme des Widerstandes in Folge des geringeren Flächeninhalts der durchbrochenen Flügel nicht ausreicht, denselben herbeizuführen; es ist eine Zunahme des Drehungsmoments bei den durchbrochenen Flügeln eingetreten.

V. Ueber eine magneto-elektrische Maschine mit continuirlichem Strom; von Hrn. Gramme.

(Compt. rend. T. LXXIII, p. 175.)

Im Allgemeinen sind die Inductionsströme instantan und hin- und hergehend; es ist indeß nicht unmöglich, sie ohne diese beiden Eigenschaften zu erzeugen.

Betrachten wir z. B. einen langen Elektromagnet EE' d. h. einen langen Stab von weichem Eisen, der mit einem isolirten Leitdraht umwickelt ist. Führt man in constanter Entfernung von ihm einen Magnetstab SN parallel mit sich, mit gleichförmiger Geschwindigkeit an ihm entlang, so wird der Pol S in dem weichem Eisen einen Magnetpol entwickeln, der sich gleichzeitig mit dem Magnetstab NS verschiebt. Die Verschiebung dieses Pols im Innern