

Der Luftwiderstand

im Allgemeinen und in seiner besonderen
Beziehung auf Luftschiffahrt.

Von

FRIEDRICH RITTER v. LÖSSL,
Oberingenieur a. D.

Vortrag, gehalten den 10. März 1886.

(Mit 2 Figuren im Texte.)

1

Hochverehrte Versammlung!

Wir Alle wissen, dass unser Erdball mit einer Hülle von atmosphärischer Luft umgeben ist, welche ihn allseits ziemlich gleichmässig bedeckt, und deren Dicke, oder, von dem festen Erdboden aus betrachtet, deren Höhe auf beiläufig 60 Kilometer zu schätzen ist.

Die gasförmig flüssige Masse der atmosphärischen Luft participirt gleich allen anderen irdischen Stoffen an der allgemeinen Gravitation und ruht deshalb auf der festen Erdrinde mit einem bestimmten Gewichtsdrucke auf, welcher, an den tiefsten Stellen des Erdbodens gemessen, durchschnittlich 1036 Gramm für jeden Quadratcentimeter oder 10363 Kilogramm für jeden Quadratmeter beträgt. Die Luft ist auch wie andere Flüssigkeiten fortwährend bestrebt, jede Vertiefung und Höhlung, welche sich in ihrer Unterlage vorfindet, auszufüllen und mit dem besagten Gewichtsdrucke in alle leeren Räumlichkeiten einzudringen, so dass nur unter ganz besonderen Bedingungen ein wirklich luftleerer Raum bestehen kann. Indess vermag die Luft das auf der Erdoberfläche ein-

gelagerte Wasser nirgends zu verdrängen, weil letzteres ein bedeutend grösseres specifisches Gewicht besitzt und deshalb die Luft von dem Wasser getragen wird und gewissermassen auf demselben schwimmt.

Das specifische Gewicht der atmosphärischen Luft ist wie jenes von anderen gasförmigen Substanzen ein höchst geringes und dort, wo keine Compression und Verdichtung derselben stattfindet, nahezu gleich Null. Die der Luft innewohnende Eigenschaft der vollkommenen Elasticität, sowie der unbegrenzten Ausdehnbarkeit und Zusammendrückbarkeit bringt es indess mit sich, dass nur die obersten Schichten der Atmosphäre frei von Compression und Verdichtung sind, die unteren aber unter der Anhäufung der darüberliegenden Massen derart belastet werden, dass sie eine entsprechende Zusammendrückung und Verdichtung erleiden. Das dabei stattfindende Verhältniss zwischen Druck oder Spannung und Volumen, respective Dichtigkeit, ist durch das Mariotte'sche Gesetz schon seit mehr als zwei Jahrhunderten vollständig klargelegt.

Wenn nun nächst der Oberfläche des Meeres aus der untersten und dichtesten Schichte der Atmosphäre, während des allgemeinen Luftdruckes von 10363 Kilogramm per Quadratmeter und des Barometerstandes von 762 Millimeter, Ein Cubikmeter Luft von 0 Grad Temperatur entnommen und im luftleeren Raume abgewogen wird, so zeigt derselbe ein Gewicht von 1294 Gramm. Hingegen wiegt ein Cubikmeter Luft von gleichfalls 0 Grad Temperatur, wenn man ihn

einer höheren Schichte der Atmosphäre, etwa in der Seehöhe von 200 Meter, z. B. in den oberen Bezirken der Stadt Wien, entnimmt, durchschnittlich nur mehr 1262 Gramm, also um 32 Gramm weniger. Würde man ferner einen Cubikmeter Luft in der Seehöhe von 4000 Meter, also auf einer sehr hohen Bergspitze, aus der Atmosphäre entnehmen und im luftleeren Raume abwägen, so würde derselbe nur mehr ein Gewicht von 784 Gramm, also um 510 Gramm weniger zeigen. Endlich könnte ein Cubikmeter Luft aus der obersten Schichte der Atmosphäre, in der Höhe von 60 Kilometer über der Erdoberfläche entnommen, nach dem Mariotte'schen Gesetze nur mehr 0.75 Gramm wiegen. Man nennt das Gewicht eines Cubikmeter Luft das Einheitsgewicht oder die Dichtigkeit derselben, wofür in physikalisch-mathematischen Formeln die Bezeichnung mit dem Buchstaben γ herkömmlich ist. Man sieht also, dass dieses γ durchaus keinen constanten Werth repräsentirt, sondern je nach der atmosphärischen Höhenschichte, auf welche es sich bezieht, zwischen weiten Grenzen variabel ist. Ueberdies unterliegt die Dichte und das Einheitsgewicht (γ) der Luft noch einer bedeutenden Veränderung durch die Temperatur. Die Luft dehnt sich bekanntlich für jeden Grad Celsius um mehr als $\frac{1}{3}$ Percent seines Volumens aus, und deshalb ist das Einheitsgewicht (γ) bei wärmerer Luft entsprechend geringer als bei kälterer.

Wir Menschen, die wir an dem festen Erdboden haften, haben es also mit einer Luftschichte zu thun,

welche in Rücksicht verschiedener Niveau- und Temperaturverhältnisse ein Einheitsgewicht von durchschnittlich $1\frac{1}{4}$ Kilogramm besitzt. Wir befinden uns gleichsam auf dem Untergrunde eines 60 Kilometer tiefengasförmig flüssigen Oceans und bewegen uns, ähnlich den auf dem Untergrund eines Gewässers wohnenden Krebsen, ebenfalls inmitten eines Mediums, welches uns von allen Seiten einhüllt und sich derart an uns anschmiegt, dass es bei jeder unserer Bewegungen verschoben und auseinandergedrängt werden muss. Doch ist diese mechanische Arbeitsleistung, welche fortwährend zu vollbringen ist, fast völlig unfühbar für uns, theils, weil wir ja daran gewöhnt sind, theils, weil das uns einschliessende Medium specifisch sehr leicht ist, indem es ein Einheitsgewicht von nur $1\frac{1}{4}$ Kilogramm besitzt, während Wasser, dessen Widerstand unserem Gefühle nicht entgeht, genau 800 mal schwerer ist, indem ein Cubikmeter desselben bei der Temperatur von 3.8 Grad Celsius 1000 Kilogramm wiegt. Den Widerstand der Luft empfinden wir nur dann, wenn unsere Bewegungen, oder auch die Bewegungen der Luft, mit hinlänglich grosser Geschwindigkeit stattfinden oder wenn wir derselben mit Gegenständen von grosser Oberfläche entgegentreten. Es ist hiebei für die mechanische Wirkung ganz gleichbedeutend, ob eine Fläche bewegt wird und die Luft stille steht, oder ob die Fläche stille steht und die Luft sich dagegen bewegt, oder ob eine beiderseitige Bewegung mit differirender Geschwindigkeit stattfindet: die bei dem Zu-

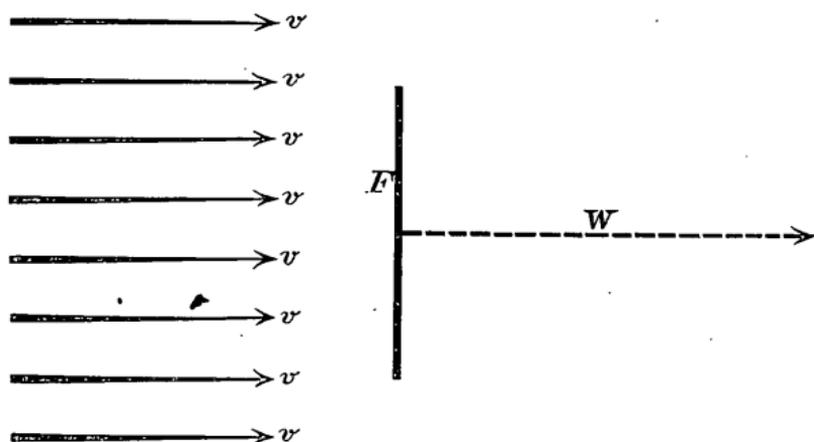
sammentreffen eintretende Kraftäusserung wird immer in gleicher Weise fühlbar werden. Man ist gewohnt, in dem Falle, als die Fläche stillsteht und die Luft sich bewegt, statt der Benennung Luftwiderstand sich des Ausdruckes Luftstoss oder Windstoss zu bedienen, oder auch den Luftwiderstand als eine entweder passive oder active Leistung des Luftstosses zu bezeichnen. Der mechanische Inbegriff bleibt immer der nämliche.

Alle Erscheinungen und Wirkungen, welche durch das blossе Gefühl des Menschen nicht genügend zu beobachten und aufzuklären sind, können selbstverständlich auf dem Wege der wissenschaftlichen Forschung, des Experiments und der technischen Erfahrung genauer ermittelt und systematisch festgestellt werden.

Da die richtige Erkenntniss der passiven und activen Leistungen des Luftwiderstandes für die Vorgänge in der Natur und für eine Menge technischer Vorrichtungen von hoher Bedeutung ist, so hat es bei allen gebildeten Nationen seit dem Beginn physikalisch wissenschaftlicher Forschungen nicht an Experimentatoren gefehlt, welche dem Studium des Luftwiderstandes, respective Luftstosses, oblagen und die gewonnenen Resultate veröffentlichten. Es würde zu weit führen, die Namen aller dieser Forscher, welche besonders zahlreich in Frankreich auftreten, hier anführen zu wollen. Es möge genügen zu sagen, dass die Resultate bis herab zu dem Vater der modernen theoretischen Mechanik, Julius Weisbach, beträchtlich

von einander abweichen, und, was neben den Fortschritten aller anderen Wissenschaften geradezu erstaunlich klingt, auch seitdem zu keiner allgemein anerkannten exacten Lösung des Problems geführt haben. Die meisten deutschen Handbücher der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik benützen zur Bestimmung des Luftwiderstandes oder Luftstosses die von Weisbach acceptirten mathematischen Formeln, obgleich dieser Autor selbst in seinem berühmten Lehrbuch den Ausspruch beifügt, dass „das Gesetz des Windstosses nicht vollständig bekannt ist, und deshalb die von ihm angegebenen Formeln und Coëfficienten nur auf Näherungswerthe führen“.

Fig. 1.



Zunächst handelt es sich immer darum, den Luftwiderstand für eine rechtwinkelig gegen das unbegrenzte Luftmedium bewegte oder rechtwinkelig von

der bewegten Luft getroffene Fläche durch eine mathematische Grundformel richtig auszudrücken, nämlich so, dass der fragliche Widerstand aus gegebenen bestimmten Factoren berechnet werden kann.

Die Auffindung einer solchen Formel, oder vielmehr die experimentelle Controle und Bestätigung ihrer Richtigkeit wurde fortwährend durch die ganz ausserordentlichen Schwierigkeiten beirrt und gehemmt, mit welchen diesbezügliche Experimente unausweichlich verbunden sind.

Wie diese Widerstands-Grundformel nunmehr, zufolge der neuesten genauen Untersuchungen, als sichergestellt und deren völlige Uebereinstimmung zwischen Theorie und Experiment als gefunden erscheint, ist sie zugleich die allereinfachste. Sie lautet:

$$\text{Widerstand oder } W = F v^2 \frac{8}{9 \cdot 81} \quad \dots \quad (I)$$

Hiedurch wird der Luftwiderstand in Kilogramm angegeben, wenn die Buchstaben folgende Bedeutung haben:

F Das Ausmass der Fläche in Quadratmetern,

v^2 die zweite Potenz der Geschwindigkeit, mit welcher die Fläche und die Luft zusammenstossen, in Sekunden-Metern,

$\frac{\gamma}{9 \cdot 81}$ das dem Barometer- und Thermometer-

stande entsprechende Einheitsgewicht der Luft in Kilogrammen, getheilt durch die Acceleration der Schwere.

Obwohl mit diesen selbstverständlichen Factoren allen physikalisch-mathematischen Anforderungen theoretisch genügt ist, so haben doch frühere Autoren hiezu noch eines weiteren Factors zu bedürfen geglaubt, nämlich eines Coëfficienten, welcher den Zweck hatte, die Formel mit den durch Experimente thatsächlich gefundenen Widerstands-Grössen in Einklang zu bringen, so wie man sich auch bei Berechnung von Maschineneffecten für die Praxis der sogenannten Erfahrungscoefficienten bedient, um die durch Nebenumstände entstehenden Kraftverluste zu berücksichtigen. Der Werth des Coëfficienten wurde zufolge verschiedener Beobachtungen sehr verschieden angegeben. Derselbe ist bald grösser, bald kleiner als 1, manchmal auch nicht constant, sondern nach Massgabe der Grösse oder Form der betreffenden Fläche variabel. Bei Weisbach ist derselbe

mit $\frac{1.86}{2}$ beziffert, so dass bei ihm die erwähnte Grundformel lautet $W = \frac{1.86}{2} F v^2 \frac{\gamma}{9.81}$, wodurch das Rechnungsergebn

gegenüber der einfachen Grundformel nur ein klein wenig, nämlich um 7 Percent, abgeschwächt wird. Die Richtigkeit dieses Coëfficienten und die wirkliche Nothwendigkeit seiner Einführung entbehrt, wie schon angedeutet, jeder theoretischen Grundlage. Das Experiment aber, welches hierüber endgiltig und unzweifelhaft zu entscheiden berufen wäre, ist, wie gesagt, mit so grossen Schwierigkeiten verbunden und ist so vielen Fehlerquellen ausgesetzt, dass hiedurch die widerspruchsvolle Verschiedenheit und folgerichtige Unverlässlichkeit aller früher aufgestellten Lehrsätze sehr wohl erklärlich wird. Noch viel wichtiger als der fragliche Coëfficient ist eine andere Modification der Grundformel, welche bei der Erläuterung des auf eine schiefgestellte Fläche auffallenden Luftstosses zur Sprache kommen soll. Auch hierüber wurde von jeher ein besonders lebhafter wissenschaftlicher Streit geführt, welcher zum Theil noch

jetzt fort dauert und im Grunde ebenfalls auf den grossen Schwierigkeiten des fehlerfreien Experimentirens beruht.

Um ein Urtheil über die erwähnten Schwierigkeiten zu ermöglichen, sei es erlaubt, auf eine generelle Erörterung solcher Experimente einzugehen, durch welche die Wirkung der gegen eine Versuchsfläche gerichteten Luftbewegung sicher beobachtet und genau gemessen werden soll.

Am einfachsten scheint die Aufgabe beim ersten Anblicke dadurch lösbar zu sein, dass man eine zweckentsprechend gestaltete Versuchsfläche an ein Rollwerk befestigt und auf einer geraden Bahn gegen die ruhende Luft vorwärts treibt, indem man durch Antriebs- oder Zuggewichte beliebige Geschwindigkeiten erzielt und dann aus dem Betrage der verwendeten Gewichte die Grösse des überwundenen Luftwiderstandes entnimmt. Hiebei müssten nun aber die in dem Apparate und Rollwerke auftretenden mitunter sehr variablen Reibungs- und Luftwiderstände im Voraus vollständig ermittelt werden, was für deren überwiegende Einflussnahme kaum mit der nöthigen Schärfe ausführbar ist. Ferner müsste die Laufbahn selbst sehr lang sein, weil im Anfange der Bewegung erst die Ueberwindung der dem Antriebsapparate, dem Rollwerke und der Versuchsfläche selbst inwohnenden Trägheitsmomente abzuwarten wäre, bevor eine gleichbleibende Geschwindigkeit bei gleichbleibender Gewichtswirkung eintreten und die Beobachtung eines stetigen Vorganges beginnen kann. Im Freien lässt sich die ganze Vorrichtung absolut nicht in Anwendung bringen, weil dort auf eine stillstehende Luftumgebung niemals gerechnet werden kann, und in einem geschlossenen Gebäude würde die hieraus sich ergebende Kürzung der Bahnlänge nur all zu flüchtige Beobachtungen gestatten. Endlich würde die in grosser Nähe der Versuchsfläche befindliche Bahnconstruction die für richtige Beobachtungen vorausgesetzte Unbegrenztheit des zu durchdringenden Luftmediums stören und zu wesentlich falschen Ergebnissen führen. Auf diesem Wege

können also die benötigten scharfen und entscheidenden Beobachtungsdaten nicht gewonnen werden, und es wurde derselbe, meines Wissens, noch von keinem Experimentator eingeschlagen.

Ein anderes Verfahren, welches schon öfters angewendet wurde, besteht darin, den natürlichen Windstoss auf eine dagegen aufgerichtete Versuchsfläche wirken zu lassen, wobei die Fläche durch ein Gewichts- oder Federwerk in ihrer Stellung festgehalten wird, so dass aus dem hiezu nöthigen Gewichte oder der sich ergebenden Biegung der stützenden Federn auf die vom Windstosse ausgeübte Wirkung geschlossen werden kann. Aber auch hiedurch lassen sich keine verlässlichen Resultate gewinnen, hauptsächlich deshalb, weil die Geschwindigkeit des natürlichen Windes in jedem Augenblick wechselt, und diese Geschwindigkeit selbst a priori nicht hinlänglich genau gemessen werden kann.

Ein ähnliches Verfahren wurde vor kurzer Zeit in England durchgeführt, wobei eine dem natürlichen Winde entgegengestellte Wand mit einer grossen Anzahl von Barometern dicht behängt wurde, deren jeder mittelst eines künstlichen Registrirwerkes den von dem Winddrucke verursachten Stand markirte. Aber auch in diesem Falle war wegen unzureichender Kenntniss der richtigen Windgeschwindigkeit kein genaues Resultat zu erhalten.

In einem anderen Falle wurde, ebenfalls in England, wie die Jahrbücher der dortigen aëronautischen Gesellschaft berichten, mit Zuhilfenahme einer Dampfmaschine und einer Gebläsemaschine ein künstlicher Luftstrom gegen eine Versuchsfläche getrieben, um den Betrag der hervorgebrachten Stosswirkung mittelst eines die Fläche stützenden Federwerkes zu ermitteln. Die Geschwindigkeit des Luftstromes wurde durch Rechnung bestimmt und durch einen Anemometer controlirt. Dieses Verfahren ist wohl an und für sich gar zu laienhaft. Denn man konnte namentlich nicht wissen, wie viel von dem Inhalte des Luftstromes wirklich auf die

Versuchsfläche stiess, und was den Anemometer betrifft, so ist jedem dieser Instrumente nur eine beiläufige Richtigkeit beizumessen, weil behufs seiner richtigen Construction das genaue Verhältniss zwischen Geschwindigkeit und Stosswirkung der Luft schon hinlänglich bekannt sein müsste, was bis in die jüngste Zeit nicht der Fall war und eben den Gegenstand der Untersuchung bildete.

Von allen Verfahrungsmethoden ist wohl jene am leichtesten auszuführen, bei welcher die betreffende Versuchsfläche gegen die stillstehende Luft in einem Kreise herumgetrieben wird, um aus den für verschiedene Geschwindigkeiten benötigten Gewichten auf den von der Luft geleisteten Widerstand zu schliessen. Dieses Verfahren ist in der That von den meisten französischen und deutschen Physikern in Anwendung gebracht worden; jedoch haben dieselben die von ihnen ausgeführte Construction des Apparates und die damit vorgenommene Manipulation, wovon doch die Schärfe der Beobachtungsergebnisse abhängt, fast niemals näher beschrieben. Ich selbst habe mit dieser Verfahrungsweise sehr viele Experimente angestellt, und habe bei zunehmender Kenntniss der in derselben verborgenen Fehlerquellen die Constructionsart öfters modificirt und möglichst zu vervollkommen getrachtet. In der Hauptsache besteht ein solcher Apparat aus einer aufrechtstehenden, in mechanisch rein gearbeiteten Lagern drehbaren Welle, von welcher nach entgegengesetzten Richtungen zwei thunlichst lange Arme horizontal auslaufen. Die äusseren Enden dieser Arme sind dazu vorge richtet, um dort Versuchsflächen oder Versuchskörper von verschiedener Grösse und Gestalt in beliebiger Stellung befestigen zu können. Die Drehung der aufrechten Welle geschieht mittelst zweier Fäden oder Drähte, welche auf der Welle aufgewickelt sind und in entgegengesetzten Richtungen horizontal zu je einer Rolle gespannt sind, jenseits welcher an sie je ein Antriebsgewicht angehängt ist. Indem man diese Gewichte ablaufen lässt und die aufrechte Welle in

Drehung versetzt, werden die an den Enden der Arme befestigten Versuchsobjecte gegen die ruhende und unbegrenzte Luft in einem verhältnissmässig grossen Kreise vorwärts getrieben. Da die Länge des Kreises bekannt ist, so lässt sich die Bewegungsgeschwindigkeit mittelst eines Secundenwerkes genau bestimmen, und ebenso aus den angehängten Gewichten der auf den Antrieb der Versuchsobjecte entfallende Druck-Quotient. Wenn man vor jeder Serie von Experimenten den leeren Apparat, d. i. die aufrechte Welle mit den Horizontalarmen, jedoch ohne Versuchsobjecte, ablaufen lässt und hiebei diejenigen Taragewichte constatirt, welche für den Leer-gang des Apparates, d. i. zur Ueberwindung aller in demselben auftretenden Reibungs- und Luftwiderstände für verschiedene Geschwindigkeiten erforderlich sind, so kann man dann mit Sicherheit auch diejenigen Nettogewichte constatiren, welche nach Befestigung der Versuchsobjecte für deren besonderen Luftwiderstand bei verschiedenen Geschwindigkeiten beansprucht werden. Um das Verhältniss zwischen Tara- und Nettogewicht nicht ungünstig zu gestalten, respective um eine höchst subtile und empfindliche Druckabwägung zu sichern, ist es nöthig, alle beweglichen Bestandtheile des Apparates aus thunlichst leichtem Materiale zu construiren und statt massiver Metallstäbe sich dünnwandiger Metallröhren zu bedienen. Auch hat es sich für die Erlangung mehrfacher genügend scharfer Beobachtungsdaten als unerlässlich herausgestellt, mehrere Apparate der gleichen Constructionsart in verschiedenen Grössenformaten zu besitzen, um sie je nach der Grösse der Versuchsobjecte zu benützen und bei den kleinsten Objecten eine Gewichtsbestimmung bis in die Bruchtheile eines Grammes zu ermöglichen.

Bei aller auf die Apparatconstruction verwendeten Sorgfalt behalten jedoch die schon erwähnten Fehlerquellen, vor welchen der Experimentator sich zu hüten hat, ihre volle Bedeutung.

Dahin gehört vor Allem der Umstand, dass jedes in der Kreisbahn herumgetriebene Versuchsobject an seinem

äusseren Rande eine grössere Weglänge zurücklegt als an seinem dem Kreismittelpunkte zugewendeten Rande. In Folge dessen ist das Object verschiedenen Bewegungs- und Stossgeschwindigkeiten der Luft ausgesetzt, und es ist daher für jede Versuchsfläche und jeden Versuchskörper vorerst das richtige Geschwindigkeits- und Stossmittel zu berechnen, welches wegen der in Wirkung tretenden zweiten Potenz des Geschwindigkeitfactors keineswegs mit dem Schwerpunkte des Objectes zusammenfällt. Wegen dieser ziemlich complicirten Berechnung muss man daher schon bei der Formgebung der Objecte bestrebt sein, jeder desfallsigen etwa unlösbaren Schwierigkeit aus dem Wege zu gehen.

Bei Flächen, welche in schiefer Stellung dem Luftstosse entgegengetrieben werden, kann das Beobachtungsergebnis wesentlich dadurch beirrt werden, dass die Ränder der Fläche nicht genügend messerartig zugeschärft sind, wonach dann ausser dem auf die Fläche selbst fallenden Luftstosse auch der Stirnwiderstand der Randdicke mitgemessen wird.

Eine sehr ausgiebige Fehlerquelle ergibt sich dadurch, dass der Experimentator das Einheitsgewicht (γ) der Luft als eine constante Grösse mit 1294 Gramm (oder nach Weisbach mit 1250 Gramm) gelten lässt. Das Einheitsgewicht ist nur während eines Barometerstandes von 762 Millimeter und bei einer Temperatur von 0 Grad 1294 Gramm. Hier in Wien auf der Seehöhe von 200 Meter ist es, wie schon früher erwähnt, durchschnittlich 1262 Gramm, und da die betreffenden Experimente schwerlich jemals bei 0 Grad Temperatur unternommen werden, bei Annahme einer Temperatur von 15 Grad Celsius nur 1193 Gramm. Hierin liegt der Grund, dass die nämlichen Experimente, abgesehen von ihrer principiell ungenauen Grundlage, so oft sie an verschiedenen Orten oder bei verschiedenen Barometerständen und Temperaturen an dem nämlichen Orte ausgeführt werden, jedesmal zu anderen Ergebnissen führen, so dass

man schliesslich sich genöthiget findet, nach variablen Coëfficienten oder Exponenten zu suchen, durch welche die mathematische Luftwiderstandsformel mit jenen Ergebnissen in Einklang gebracht werden soll. Dies ist auch auf dem Gebiet der Ballistik der Fall, wo ebenfalls bezüglich des Luftwiderstandes mit einem constanten und nicht dem jeweilig wechselnden Luftgewichte gerechnet wird. Es ist durchaus nothwendig, vor jedem Experimente den Stand des Barometers und Thermometers zu beobachten und das wirkliche Einheitsgewicht der Luft genau festzustellen.

Endlich ist anzuführen, dass alle Experimente, bei welchen die Versuchsobjecte gegen die Luft vorwärts getrieben werden, nur dann richtige und mit der Grundformel übereinstimmende Resultate liefern können, wenn die den Versuchsapparat umgebende Luftmasse unbegrenzt ist und wirklich stille steht. Es muss daher der Raum nächst der Bewegungsbahn von allen Seiten frei gehalten werden und darf weder durch die Nähe von Wänden oder des Bodens und Plafonds, noch durch andere Gegenstände oder durch den Körper des Experimentators selbst beengt sein. In diesem Falle könnte die Luft nicht allseits frei ausweichen, und würde stellenweise längs der beengenden Gegenstände in eine fortschreitende Parallelbewegung gerathen, wödurch der Betrag des Luftwiderstandes sofort eine erhebliche Alteration erlitte und die nur für ein unbegrenztes und ruhiges Luftmedium giltige Grundformel niemals ihre experimentelle Bestätigung finden könnte. Will man mit Versuchsflächen in der Grösse von 2 Quadratmetern fehlerfrei operiren, so gehört hiezu erfahrungsmässig ein leerer Saal von wenigstens 10 Meter Weite und 6 Meter Höhe.

Ich habe mir erlaubt, die hauptsächlichsten Fehlerquellen so ausführlich darzustellen, damit es deutlich ersichtlich sei, welche aussergewöhnliche Vorsicht und Subtilität zur Erlangung gleichbleibender und verlässlicher Resultate

nöthig ist, und warum bezüglich des Luftwiderstandsgesetzes bis in die jüngste Zeit differirende Ansichten auftauchen und fortbestehen konnten.

Ich werde mir erlauben, aus den bestehenden differirenden Daten nur diejenigen festzuhalten, welche durch meine eigenen Untersuchungen bestätigt sind.

Die wirkliche Ausrechnung des rechtwinkligen Luftwiderstandes ergibt beispielsweise die folgenden Resultate:

Wenn bei einem Barometerstand von 762 Milli-			
meter und der Temperatur von 0 Grad die Geschwin-			
digkeit des Luftstosses 1 Secundenmeter beträgt,			
ist die Druckwirkung für jeden Quadratmeter der			
Fläche			132 Gr.;
bei der Geschwindigkeit von 2 Secundenmeter			528 „
„ „ „ „ 5			3·3 Kg.;
„ „ „ „ 10			13·2 „
„ „ „ „ 15			29·7 „
„ „ „ „ 20			52·8 „
„ „ „ „ 25			69·3 „
„ „ „ „ 40			211 „

Es tritt also bei zunehmender Geschwindigkeit (v) eine sehr bedeutende Progression des Widerstandsverhältnisses ein, indem der Widerstand bei 25 Secundenmeter Geschwindigkeit 525mal grösser ist als bei 1 Secundenmeter. Die letzte Geschwindigkeit von 25 Secundenmeter entspricht der Schnelligkeit eines Eisenbahnschnellzuges oder eines der heftigsten Sturmwinde, welcher 90 Kilometer in der Stunde zurücklegt.

In der Baukunde nimmt man gewöhnlich an, dass aufrechtstehende, nicht besonders exponirte Gebäudeflächen dem Winddrucke einen Widerstand von wenigstens 75 bis in maximo 125 Kilogramm pro Quadratmeter zu leisten haben.

Rechnet man nach der Formel den Gesamtwiderstand, welchen bei einem Sturmé von 25 Secundenmeter z.B. eine freistehende, der Windrichtung rechtwinkelig zugewendete Gebäudefront von 50 Meter Länge und 20 Meter Höhe zu leisten hat, so ergeben sich nicht weniger als 69300 Kilogramm oder rund 69 Tonnen. Davon entfällt auf jedes etwa 3 Quadratmeter haltende Fenster ein Druck von 209 Kilogramm, welcher Druck jedoch für gewöhnlich wegen des dahinter befindlichen eingeschlossenen Luftkörpers nicht gefährlich wird.

Es können aber auch in unseren Gegenden an besonders hiezu geeigneten Orten einzelne Windstöße die Geschwindigkeit bis zu 40 Secundenmeter annehmen, in welchem Falle dann ein Widerstand von 211 Kilogramm per Quadratmeter zu leisten ist. Aehnliche Winddrücke wurden bei Borastürmen in der Karstgegend, namentlich von Herrn Professor Schön constatirt, so dass hiedurch Eisenbahnwaggons ins Schwanken und dem Umsturze nahe gebracht werden können. Als während des Sturmes am 10. December 1884 auf einem Damme der Wien—Aspang-Bahn wirklich mehrere Wagen umgestürzt wurden, ergab sich durch Berechnung, dass die 15 bis 16 Quadratmeter haltende Breitseite eines solchen Wagens in rechtwinkelig

Richtung einen Winddruck von 3300 Kilogramm, also per Quadratmeter von 206 bis 220 Kilogramm empfangen haben müsse, was also einer momentanen Luftgeschwindigkeit von 40 Secundenmeter entspricht.

Wenn Sturmwinde auf die Stirnseite eines Eisenbahnzuges treffen und zufällig die Richtung der Fahrt eine entgegengesetzte ist, so können Druckwirkungen eintreten, welche den grösseren Theil der Zugkraft der Locomotive absorbiren.

Im Kleinen lässt sich die Erscheinung des Luftwiderstandes leicht erkennen, wenn man ein horizontal liegendes Blatt Papier in senkrechter Richtung zu Boden fallen lässt. Hierbei verhindert der auf die untere Blattseite wirkende Luftwiderstand, dass die Geschwindigkeit des Falles weiter zunimmt, als bis zwischen dem Gewichte des Papiers und der gesetzmässigen Widerstandswirkung das Gleichgewicht des Druckes eintritt. Die Grundfläche eines Blattes der „Neuen Freien Presse“ hält circa 1500 Quadratcentimeter. Das Gewicht desselben beträgt circa 8 Gramm. Weil nun der Widerstand der Luft bei der Fall-, respective Bewegungsgeschwindigkeit von 0.636 Secundenmeter sich ebenfalls mit 8 Gramm berechnet, so kann dieses Blatt aus jeder beliebigen Höhe nicht schneller herabfallen als mit der Geschwindigkeit von 0.636 Secundenmeter. Bei einer Fallhöhe von 2 Meter bedarf es also eines Zeitraumes von beiläufig 3 Secunden. Würde dieses Blatt nicht durch die Luft, sondern durch einen luftleeren Raum zu Boden fallen, so würde es mit einer

zehnmal grösseren Endgeschwindigkeit, nämlich mit 6·3 Secundenmeter ankommen und nur eines Zeitraumes von 0·6 Secunden bedürfen.

Aehnlich verhält es sich mit einem Fallschirm. Wenn derselbe einschliesslich des Gewichtes eines Menschen 100 Kilogramm wiegt und seine Fall-, respective Endgeschwindigkeit auf 5 Secundenmeter eingeschränkt werden soll, so bedarf er hiezu einer gegen die Bewegungsrichtung rechtwinkelig eingestellten Quadratfläche von 30·3 Quadratmetern, was einem Durchmesser von 6·25 Meter entspricht. Es wird dann zufolge der Grundformel der Luftwiderstand ebenfalls 100 Kilogramm betragen und eine 5 Secundenmeter übersteigende Fallbeschleunigung nicht eintreten; immer unter der Voraussetzung, dass der Barometerstand 762 Millimeter und das Einheitsgewicht der Luft 1294 Gramm sei. Die Fallgeschwindigkeit von 5 Secundenmeter ist ebenso gross wie bei einem Menschen, welcher aus einer Höhe von $1\frac{1}{4}$ Meter zu Boden springt oder fällt. Zur grösseren Sicherheit nimmt man gewöhnlich den Durchmesser mit 7 bis 8 Meter.

Aus den jüngsten Versuchen hat sich, im Gegensatze zu mehrfach verbreiteten Meinungen, die interessante Thatsache ergeben, dass Vertiefungen und Höhlungen, welche in einer ebenen Fläche angebracht sind, an dem Luftwiderstande keine Aenderung hervorbringen. Selbst wenn eine dem Luftstrome entgegengestellte Fläche vollständig ausgehöhlt ist, wie z. B. eine halbe Hohlkugel,

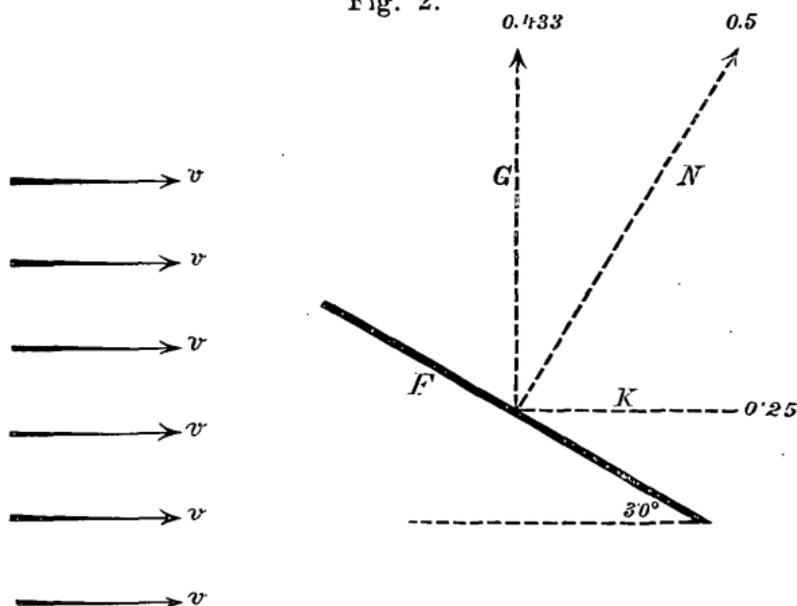
zeigt sich der nämliche Widerstand wie bei einer ebenen Fläche, insolange nämlich, als die Ränder der Fläche genau rechtwinkelig zur Bewegungsrichtung stehen und kein Luftstrahl direct auf eine concave Innenwand der Höhlung gerichtet ist. Die in der Höhlung eingeschlossene Luft bleibt in diesem Falle ruhend und verhält sich neutral zu der ausserhalb vor sich gehenden Bewegung, indem sie gewissermassen nur eine Ergänzung der defecten Oberfläche bildet. Sie befindet sich übrigens in einer der äusseren Luftstosswirkung entsprechenden Compression und Verdichtung.

Bis jetzt war nur von Flächen die Rede, welche der Richtung der Luftbewegung rechtwinkelig entgegengestellt sind, und wir kommen jetzt zu denen, welche in schiefer Stellung mit dem Luftstrome zusammentreffen. Selbstverständlicher Weise muss in diesem Falle die Wirkung des Stosses, respective der zu leistende Widerstand schwächer sein. Wenn der Schiefstellungswinkel der Fläche mit α bezeichnet wird, so findet die Abschwächung nach Massgabe von $\sin \alpha$ statt. Man muss also zur Berechnung des nunmehrigen Widerstandes in die mehrerwähnte einfache Grundformel den weiteren Factor $\sin \alpha$ einsetzen. Dieser Widerstandsbetrag ist dann derjenige, welchen die Fläche, obwohl schief von dem Luftstrome getroffen, in rechtwinkliger oder normaler Richtung zu leisten hat. Die Formel des Normalstosses oder Widerstandes lautet also:

$$N = F \sin \alpha v^2 \frac{\gamma}{9 \cdot 81} \quad \dots \quad (II)$$

Frägt man aber, wie gross der Widerstand sei, welchen die Fläche nicht in normaler Richtung, sondern in der Richtung der Luftströmung zu leisten habe, so ist hiefür nach dem Gesetze der Kraftcomponenten

Fig. 2.



noch einmal der Factor $\sin \alpha$ einzusetzen, so dass nunmehr die Formel für den directen oder Parallelstoss und Widerstand lautet:

$$K = F \sin^2 \alpha v^2 \frac{\gamma}{9 \cdot 81} \quad \dots \quad (III)$$

Und frägt man endlich, wie gross der Widerstand sei, welchen die Fläche im rechten Winkel zur Richtung der Luftströmung zu leisten habe, so ist statt des

letzteren $\sin \alpha$ die andere Kraftcomponente $\cos \alpha$ einzusetzen, wonach dann die Formel für den Seitenstoss oder Widerstand lautet:

$$G = F \sin \alpha \cos \alpha v^2 \frac{\gamma}{9 \cdot 81} \quad . \quad . \quad (IV)$$

Es ist dabei zu bemerken, dass der in der Formel für den Normalstoss N eingesetzte Factor $\sin \alpha$ von jeher ein strittiger war. Viele Autoren, darunter auch Weisbach, nehmen an, dass $\sin \alpha$ in der zweiten Potenz stehen müsse, also $\sin^2 \alpha$. Andere sogar halten die noch höhere Potenz $\sin^3 \alpha$ für richtig, und noch Andere haben zwischen den ganzen Zahlen 1, 2 und 3 liegende Potenzen als entsprechend gefunden oder die Potenz von $\sin \alpha$ als einen von der Grösse des Winkels α abhängigen variablen Werth bezeichnet. Solche in die Formel des Normalwiderstandes eingeführte Factoren gingen dann folgerichtig auch in die Formeln für den directen Widerstand K und den Seitenwiderstand G über und hatten in der Hauptsache zur Folge, dass die Wirkungen des Luftstosses nach jeder Hinsicht mehr oder weniger zu niedrig berechnet wurden.

Zufolge meiner eigenen experimentellen Untersuchungen muss ich die Formeln, wie sie soeben aufgestellt wurden, als die theoretisch und experimentell alleinig berechtigten aufrechterhalten. Jedoch ist es mir mit Hilfe der angewendeten Versuchsapparate nicht gelungen, für die Winkel α , auch wenn sie sehr spitzig sind, d. i. weniger als 5 Grad betragen, vollkommen evidente experimentelle Beweise zu schaffen.

Um nun an die früheren Beispiele anzuknüpfen, wobei das rechtwinkelige Zusammentreffen einer Fläche mit der Luftströmung exemplificirt würde, setzen wir jetzt den Fall, dass eine Fläche unter dem Winkel von

30 Grad getroffen werde. Sonach wird jeder Quadratmeter der Fläche in normaler Richtung gemessen nur mehr 0·5, d. i. die Hälfte des früheren Widerstandes zu leisten haben, dann, in der directen Richtung des Luftstromes gemessen, 0·25, d. i. ein Viertel des früheren Betrages, endlich in der seitlichen Richtung, nämlich rechtwinkelig zur Luftströmung gemessen, 0·433 des früheren Betrages. Jene Gebäudefront also, welche bei dem Sturmwinde von 25 Secundenmeter Geschwindigkeit einen Gesamtwiderstand von 69 Tonnen zu leisten hat, wird, wenn der Sturm unter dem Winkel von 30 Grad schief auffällt, in normaler Richtung nur $34\frac{1}{2}$ Tonnen Widerstand zu leisten haben.

Das Gesetz des directen oder parallelen Luftwiderstandes findet Anwendung bei der Construction von Exhaustoren, Ventilatoren und ähnlichen Mechanismen, sowie auch bei den schraubenartig wirkenden Flügelwerken, mittelst deren man die Vorwärtsbewegung kleiner Fluggegenstände und in sehr beschränktem Masse auch der Luftballons zu Stande brachte.

Das Gesetz des Seiten-Widerstandes bildet die Grundlage zur Construction der Windmühlflügel und der Vertical-Windräder oder Windmotoren. Es wird z. B. die Fläche einer Windradsprosse, wenn sie zufällig unter dem Winkel von 30 Grad schief gegen die Windrichtung steht, einen auf die Umdrehung des Rades wirkenden Seitendruck empfangen, welcher 0·433 desjenigen vollen Widerstandes ausmacht, welchen die Sprosse bei rechtwinkliger Stellung zu leisten hätte.

Am grössten ist der Seitendruck, wenn die Sprosse unter dem Winkel von 45 Grad schief steht.

Besonders interessant sind die Vorgänge bei Flächen, welche mit Einhaltung eines bestimmten Schiefstellungswinkels frei dem Luftstrome überlassen werden, wie dies z. B. bei einem Papierdrachen der Fall ist. Wird einem solchen Drachen, welcher den Flächenraum von 2 Quadratmeter besitzt, mittelst seiner Befestigung an der Haltschnur ein verticaler Neigungswinkel von 20 Grad ertheilt und erhalten, so ergibt sich Folgendes. Bei einer Luftgeschwindigkeit von 5 Secundenmeter hat er in der Luftströmungsrichtung einen parallelen oder directen Widerstand von 0·772 Kilogramm zu leisten. Dazu beträgt der Seitendruck, welchen er rechtwinkelig zur Luftströmung, d. i. in verticaler Richtung auf seiner Unterseite empfängt, 2·122 Kilogramm. Das Gewicht des Drachen sammt Halteschnur und sonstigen Anhängseln darf also, wenn er nicht herabfallen soll, nicht grösser sein als 2·122 Kilogramm. Würde die Windgeschwindigkeit 10 Secundenmeter sein, so ergibt sich der directe Widerstand mit 3·089 Kilogramm und der verticale Druck oder Auftrieb mit 8·487 Kilogramm, d. h. das Gewicht des Drachen dürfte sogar mehr als 8 Kilogramm betragen. In diesen Rechnungen ist indess die Dicke des vorderen Randes, welcher noch einen besonderen Widerstand leistet, nicht berücksichtigt, so dass in Wirklichkeit der directe Widerstand etwas grösser ausfällt; und ebenso ist das in höheren Luftschichten und bei

höherer Temperatur geringere Einheitsgewicht (γ) der Luft nicht in Betracht gezogen, weshalb in Wirklichkeit der Auftrieb und das erlaubte Eigengewicht des Drachen sich entsprechend kleiner zeigen werden.

Analog zu den Vorgängen bei einem Papierdrachen ist der Flug eines Vogel zu beurtheilen, wenn er mit ausgebreiteten Flügeln und Schwanzfedern gewissermassen als schiefe Fläche durch die Luft dahinschiesst. Es besteht hinsichtlich des Widerstandes nur der mechanisch gleichgiltige Unterschied, dass der Drache stillsteht, während die Luft sich bewegt, und anderseits der Vogel durch eigene Kraft sich vorwärts bewegt, während die ihn umgebende Luft als stillstehend anzusehen ist.

Eine gewöhnliche Taube besitzt ein beiläufiges Gewicht von 0·3 Kilogramm und bei ausgebreiteten Flügeln und Schwanzfedern eine Fläche von 0·075 Quadratmeter. Wenn bei ihrem Dahinschweben oder Streichen ihr Gewicht von der Luft, deren Einheitsgewicht wir zu 1·1 Kilogramm annehmen, in horizontalem Niveau getragen und am Herabsinken gehindert werden soll, so bedarf die Taube bei einer Neigung der Körperfläche im Winkel von 5 Graden einer Eigengeschwindigkeit von 20·3 Secundenmeter, bei einem Neigungswinkel von 10 Graden einer Eigengeschwindigkeit von 14·5 Secundenmeter, von 10 Graden einer Eigengeschwindigkeit von 10·5 Secundenmeter, von 45 Graden einer Eigengeschwindigkeit von 8·5 Secundenmeter. Ohne die entsprechende Geschwindigkeit ist ihr das

Schweben in der Luft eine Unmöglichkeit. Berechnet man ferner den directen und gesammten Stirnwiderstand der Taube und die zur Ueberwindung desselben erforderliche Arbeitskraft, so findet man, dass der horizontale Flug dann mit dem kleinsten Arbeitsbedarf, also mit der thunlichsten Kraftökonomie vollführt wird, wenn die Winkelstellung 8 Grad und die Eigengeschwindigkeit 16 Secundenmeter beträgt.

Bei der feiner gebauten Brieftaube, deren Gewicht und Stirnwiderstand etwas geringer ist, ergibt sich die Fluggeschwindigkeit von circa 20 Secundenmeter als die ökonomischeste und also auch diejenige, welche sie bei ihren Fernflügen in Anwendung zu bringen Ursache hat. Wenn sich gleichwohl aus den von Brieftauben wirklich zurückgelegten Distanzen und dazu gebrauchten Zeiträumen manchmal eine noch grössere Geschwindigkeit entziffert, so ist dies recht wohl aus dem Umstande zu erklären, dass das Luftmedium, welches die fliegende Taube umgibt und ihren alleinigen Stützpunkt bildet, während des Fluges für sich selbst dem Reiseziele zuströmt und die Flugbahn der Taube abgekürzt hat.

Es scheint einer jeden Vogelart eine ihr eigenthümliche mittlere Fluggeschwindigkeit verliehen zu sein, welche für den Kraftbedarf bei horizontaler Flugrichtung die ökonomischeste ist und weder gesteigert, noch auch vermindert werden kann, ohne einen Mehraufwand an Kraft zu bedingen. Nebenbei ist aber gleichzeitig gewiss, dass die Vögel zeitweise und für einzelne Distanzen noch viel grössere als die besagten

mittleren Fluggeschwindigkeiten vollbringen und dabei sogar jeden Kraftverbrauch ersparen können, wenn sie nämlich nicht in horizontaler Richtung geradeaus, sondern in schiefer Linie abwärts fliegen, wobei ihre eigene den Muskeln entstammende Betriebskraft durch die Wirkung der Gravitation ersetzt wird. Freilich kann dies nur dann geschehen, wenn sie die Höhe, aus welcher sie sich herablassen, schon früher durch eine vermehrte Kraftentfaltung erstiegen haben. Vielen Vogelarten scheint das wechselweise Steigen und Fallen, d. i. der sogenannte Wellenflug eine Erleichterung ihres Kraftaufwandes zu bieten.

Es würde zu weit führen, nun auch den complicirten Inbegriff des Flügelschlages der Vögel oder anderer Flugthiere in Bezug auf das Widerstandsgesetz näher erörtern zu wollen. Im Allgemeinen muss jeder Flügelschlag mit solcher Energie und momentaner Geschwindigkeit geführt werden, dass ein hinlänglich grosser Luftwiderstand erzeugt wird, welcher dem Vogel die seinem Gewichte fehlende feste Unterstützung zu ersetzen vermag. Der Niederschlag der Flügel erfolgt gewöhnlich nicht in rein verticaler Richtung, damit ausser der grösseren Kraftcomponente, welche den Auftrieb erzielt, auch noch eine kleinere Componente zur Vorwärtsbewegung, respective zur Ueberwindung des directen Stirnwiderstandes sich ergibt. Ist einmal eine bestimmte Vorwärtsbewegung mit der zum Schwebeflug nöthigen Geschwindigkeit erreicht, so haben die weiteren Flügelschläge nur mehr die Auf-

gabe, die durch den Stirnwiderstand verursachten Kräfteverluste wieder zu ersetzen.

Und so verlassen wir den Vogelflug, um wieder zu dem concreten Luftwiderstandsgesetz zurückzukehren.

Es hat sich bei der Beobachtung sowohl der rechtwinkelig als der schief gegen die Bewegungsrichtung der Luft gestellten Flächen der merkwürdige Umstand ergeben, dass kleine und grosse Flächen einen proportional ganz gleichen Widerstandsdruck empfangen. Auch diese Thatsache wurde von jeher bezweifelt und widersprochen, indem einerseits noch jetzt geglaubt wird, dass bei grösseren Flächen ein proportional grösserer Widerstand aufträte als bei kleineren, und andererseits das gerade Gegentheil behauptet wird. Meine eigenen Experimente beweisen, dass eine Versuchsfläche von 10.000 Quadratcentimeter Inhalt, unter sonst gleichen Umständen, genau 1000mal mehr Druck empfängt als eine Versuchsfläche von 10 Quadratcentimeter. Hieraus folgt, dass die aufgestellten Formeln für alle beliebigen Grössenverhältnisse von Flächen und folgerichtig auch von Körpern gleichmässige Giltigkeit haben und keines Coëfficienten bedürfen, welcher von der Flächengrösse abhängig wäre.

Ebenso hat sich experimentell herausgestellt, dass auch die geometrische Figur, welche eine Fläche bildet, für deren Luftwiderstandsverhältnisse ganz gleichgiltig ist und das Quadratausmass der Fläche für sich ganz allein von entscheidender

Bedeutung ist. Das Experiment zeigte, dass auf einer Fläche, welche z. B. 1 Quadratmeter umfasst, keine Aenderung des Widerstandsverhältnisses eintritt, ob sie nun die Form eines Quadrates, oder eines Dreieckes, oder einer Scheibe, oder eines langgestreckten Rechteckes u. s. f. besitzt. Diese Thatsachen der proportional sich gleichbleibenden Widerstandsgrösse sind allerdings geeignet, jeden auf diesem Gebiete thätigen Fachmann und insbesondere auch den Experimentator selbst zu überraschen, wenn man nämlich von der üblichen Vorstellung ausgeht, dass der gegen eine Fläche gerichtete Luftstrom, wirklich auf die Fläche auffällt. Hierbei müssten diejenigen Luftstrahlen, welche die Mitte der Fläche treffen, einen weiteren Weg bis zum Rande der Fläche zurücklegen, um nach der Seite auszuweichen, als jene Luftstrahlen, welche ohnedem in der Nähe des Randes auffallen. Die Zurücklegung des weiteren Weges müsste auch eine intensivere Widerstandswirkung verursachen, und folgerichtig würde auf grossen Flächen durch das allgemein erschwerte Ausweichen der Luftstrahlen überhaupt ein grösserer Effect hervorgebracht als auf kleinen oder schmalen Flächen. Die Sache verhält sich aber ganz anders, indem die Fläche innerhalb ihrer Ränder überhaupt von keinen Luftstrahlen getroffen wird. Es baut sich vielmehr auf jeder dem Luftstrome entgegengestellten Fläche und ebenso auf jedem körperlichen Objecte ein Hügel von ruhender Luft auf, dessen Böschungen als Gleitflächen der bewegten Luftstrahlen dienen. Die

Gestalt dieses Hügels gleicht, je nach der Configuration seiner Basis, einer Pyramide, einem Kegel, einem Keil u. s. w. (deren Spitze oder Schneide nur dann über dem Schwerpunkte der Basis liegt, wenn letztere rechtwinkelig gegen den Luftstrom gestellt ist). Der herankommende Luftstrom theilt sich an der Spitze oder Schneide des Hügels und gelangt längs der Gleitflächen, welche allseits den nämlichen Neigungswinkel (β) besitzen, an die äusseren Ränder des Objectes. Die in dem Hügel enthaltene Luft befindet sich unter der von allen Seiten gleichartigen Inanspruchnahme im statischen Gleichgewichte, erleidet eine entsprechende Compression und überträgt schliesslich den empfangenen Druck ganz gleichmässig auf ihre Unterlage. Dies ist der wesentliche Vorgang bei regelmässig gestalteten Versuchsobjecten, wenn sie in gleichmässiger Bewegung mit der unbegrenzten ruhigen Luft zusammentreffen. Bei unregelmässig gestalteten Flächen- und Körperformen und bei ungleich fliessenden Luftströmen ergibt sich selbstverständlich eine grosse und wechselvolle Mannigfaltigkeit von Hügelbildungen, welche theoretisch nicht mehr verfolgt und zergliedert werden können. Man kann sich von der principiellen Richtigkeit der Hügelbildung leicht überzeugen, wenn man in der Mitte einer quadratisch geformten Versuchsfläche ein Licht befestigt und dann die Fläche gegen die stillstehende Luft vorwärts treibt. Bei jeder beliebigen Geschwindigkeit der Bewegung wird die Flamme ruhig fortbrennen, ohne nach irgend einer

Seite gebeugt zu werden, und hiedurch den Beweis liefern, dass sie von keinem strömenden Luftstrahle getroffen wird, und noch weniger die hinter der Flamme liegende Mitte der Fläche. Man kann das Licht gegen die Ränder der Fläche und auch in der Mitte der Fläche auf eine bestimmte Entfernung nach vorwärts verschieben, ohne dass es auch in dieser Stellung von der strömenden Luft getroffen wird. Betrachtet man den Vorgang genauer, so findet man, dass der auf der Fläche sich aus ruhiger Luft aufbauende Hügel die Form einer Pyramide hat, deren Seitenflächen den Neigungswinkel (β) von 45 Grad besitzen. Der ganz gleiche Vorgang kann an der Rückseite der Versuchsfäche beobachtet werden; jedoch besteht hier die Luftpyramide nicht aus comprimierter Luft, sondern muss aus verdünnter Luft bestehen. Die Spitze der rückwärtigen Pyramide ist selbstverständlich der Punkt, in welchem der durch die Fläche auseinander gedrängte Luftstrom wieder in seine parallelfliessende Anordnung vollends zusammentritt.

Aber nicht blos bei der Luft, sondern auch bei anderen Medien, durch welche Flächen oder Körper hindurchgedrängt werden, tritt die Erscheinung der Hügelbildung auf. Beim Einrammen von Piloten in einem Terrain, welches aus plastischer, verschieblicher Thonerde bestand, wurde die den Bauführer überraschende Wahrnehmung gemacht, dass mehrere eichene $\frac{1}{2}$ Meter dicke Piloten, deren unteres Ende rechtwinkelig abgeschnitten und aus Versehen nicht

zugespitzt worden war, sich mit der gleichen Anzahl von Schlägen der Dampfhamme und im gleichen Tempo wie die zugespitzten Piloten einrammen liessen. Als dann behufs Klarlegung des Phänomens einige dieser stumpfen Piloten bis unterhalb ihres unteren Endes ausgegraben wurden, ergab der Augenschein, dass sich an die horizontale Schnittfläche des Eichenholzes ein aus stark comprimierter Thonerde bestehender, ziemlich scharf zugespitzter Kegel angesetzt hatte, welcher die Stelle der fehlenden Holzspitze ersetzte und wie diese mit seinen seitlichen Gleitflächen das ihn umgebende Medium auseinander drängte. Dieser Fall bildet eine sichtbare Analogie zur Hügelbildung bei Durchdringung des Luftmediums. Solche aus ruhiger Luft sich bildende Hügel oder adhärende Bedeckungen erklären auch die experimentelle Wahrnehmung, dass es keinen Unterschied mache, ob die Stirnfläche eines gegen die Luft bewegten Objectes rauh oder glatt sei. Es werden ja nur die äussersten Ränder eines solchen Objectes von den abgleitenden Luftstrahlen wirklich tangirt, und auch hier scheinen rauhe Stellen von einem adhärenden dünnen Lufthäutchen derart eingehüllt zu werden, dass keine Steigerung des Luftwiderstandes eintritt und nur das Object nach Massgabe der rauhen Hervorragungen und der Dicke des Lufthäutchens als vergrössert anzusehen ist.

Somit können wir die Widerstandsverhältnisse bei ebenen Flächen jetzt verlassen und auf das Ver-

halten der erhabenen Oberflächen körperlicher Objecte übergehen.

Ein mit der Schneide gegen die Luft gekehrter Keil verhält sich ebenso, als wenn seine Seitenflächen mit der gleichen Schiefstellung einzeln gegen die Luft bewegt würden.

Bei einem pyramidenförmigen Körper, welcher drei oder vier Seiten hat und mit seiner Spitze gegen die Luft sich bewegt, ist gleichfalls der Widerstand ebenso gross, wie dessen einzelne Seitenflächen unter dem nämlichen Schiefstellungswinkel ergeben würden. Besitzt jedoch die Pyramide mehr als vier Seiten, so nähert sich ihr Widerstandsverhältniss jenem eines Kegels und wird etwas geringer.

Der Widerstand eines mit der Spitze gegen die Luft gerichteten Kegels zeigt sich in Wirklichkeit kleiner, als wenn man ihn als vielseitige Pyramide betrachtet und seine Mantelfläche in Rechnung nimmt. Am einfachsten erhält man das Widerstandsverhältniss des Kegels, wenn man den Druck auf die rechtwinkelig gestellte Kreisfläche seiner Basis berechnet und das Resultat durch den Divisor $\sin \alpha + \operatorname{ctg} \alpha$ theilt. (Die Formel heisst:

$$W_{ke} = \frac{f}{\sin \alpha + \operatorname{ctg} \alpha} v^2 \frac{\gamma}{9.81} \quad . \quad . \quad (V)$$

worin f den Flächenraum der Basis und α den halben Winkel an der Kegelspitze bedeutet.)

Indessen haben die Luftwiderstandsverhältnisse der Keile, Pyramiden und Kegel für das praktische Leben nur eine untergeordnete Bedeutung.

Wichtiger ist das für die Cylinderform bestehende Widerstandsverhältniss. Wenn ein Cylinder rechtwinkelig mit seiner Achse der Luftbewegung entgegensteht, so ist die Wirkung genau ebenso gross, als wenn man die Fläche des durch die Achse geführten Längenschnittes des Cylinders rechtwinkelig dem Luftstosse aussetzt und von dem resultirenden Betrage zwei Drittel nimmt. (Die Formel lautet:

$$W_{cy} = \frac{2}{3} f v^2 \frac{\gamma}{9.81} \dots \dots \dots \text{(VI)}$$

worin f die Fläche des Cylinder-Längenschnittes bezeichnet.) Dieses Verhältniss wurde jüngst auch von anderer Seite experimentell aufgefunden.

Wenn also beispielsweise der Schaft einer runden Säule oder eines cylindrischen Hochkamines, welcher die Höhe von 15 Meter und die Dicke von 1.2 Meter besitzt, einem Sturmwinde von 25 Secundenmeter Geschwindigkeit, d. i. 90 Kilometer per Stunde ausgesetzt ist, so beträgt der zu leistende Widerstand 832 Kilogramm, während eine viereckige Form von gleicher Höhe und Dicke um die Hälfte mehr Widerstand zu leisten hätte, nämlich 1248 Kilogramm.

Von grosser praktischer Bedeutung ist die Kenntniss des Luftwiderstandes bei einer Kugel. Hierüber sind, wie bei allen anderen Partien der Luftwiderstandsgesetze, von jeher sehr verschiedene Ansichten

und Behauptungen aufgestellt worden. Auf Grund meiner eigenen sorgfältigen Experimente muss ich dem Lehrsatze beipflichten, dass der Kugelwiderstand genau ebenso gross ist, als wenn ein Drittel der grössten Durchschnittsfläche der Kugel rechtwinkelig dem Luftstrome entgegengestellt wird. (Die Formel hiefür lautet:

$$W_{ku} = \frac{f}{3} v^2 \frac{\gamma}{9.81} \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (\text{VII})$$

worin f die Fläche des grössten Kugeldurchschnittes bedeutet.)

Nebenbei sei bemerkt, dass auch auf der dem Luftstrome entgegengestellten Kugel die früher besprochene Hügelbildung stattfindet, und zwar in Kegelform sowohl auf der Vorderseite als auch auf der Rückseite. Die in beiden Kegeln enthaltene und der Kugel adhärende ruhige Luft scheint zufolge meiner Untersuchungen einen Kubikinhalt zu besitzen von nicht weniger als 0.7 des Kugelinhaltes.

Ein naheliegendes Beispiel für den Kugelwiderstand bildet ein Gasballon, wenn derselbe als allseitig kugelförmig angesehen wird. Für einen solchen Ballon mit 20 Meter Durchmesser beträgt der gegen eine Luftgeschwindigkeit von 5 Secundenmeter zu leistende Widerstand 345 Kilogramm, gegen die Luftgeschwindigkeit von 10 Secundenmeter der Widerstand 1382 Kilogramm. Wollte man den Ballon mit denselben Geschwindigkeiten gegen die ruhende Luft fortdauernd vorwärtstreiben, so bedürfte man im ersteren Falle

einer effectiven Betriebskraft von 1725 Secundenmeter-Kilogramm, d. i. 23 Pferdekräfte, und im zweiten Falle von 13820 Secundenmeter-Kilogramm, d. i. 184 Pferdekräfte. Wollte man diesen Ballon etwa gar mit Eisenbahngeschwindigkeit in der Luft vorwärtstreiben, also mit der Geschwindigkeit von etwa 20 Secundenmeter, d. i. 72 Kilometer per Stunde, so wäre hiezu eine Antriebskraft von beiläufig 1475 Pferden erforderlich. Selbstverständlich reicht der Gasinhalt eines Ballons von 20 Meter Durchmesser bei Weitem nicht hin, um eine Motormaschine von solcher Leistungsfähigkeit nebst allen Zubehörnissen und Vorräthen mitzutragen, und anderseits kann eine Ballonhülle den Angriff solcher Kräfte nicht aufnehmen, ohne zerstört zu werden. Einen Ballon mit der Geschwindigkeit von 20 Secundenmeter vorwärts bewegen zu wollen, ist das Nämliche, als wenn man ihn vom Erdboden aus festhält und ungedeckt einem Windstosse von 20 Secundenmeter Geschwindigkeit preisgibt. Bis jetzt sind alle Ballons bei weit geringerem Angriffe in Fetzen zerissen worden.

Ich scheue mich nicht, auszusprechen, dass es vermöge des Luftwiderstandsgesetzes niemals gelingen kann, einem Kugelballon eine praktisch nutzbare Eigengeschwindigkeit zu verleihen, oder, wie man zu sagen pflegt, ihn lenkbar zu machen. Die Lenkbarkeit oder Steuerungsfähigkeit eines Fahrzeuges hat immer zur Voraussetzung, dass dasselbe eine Eigengeschwindigkeit besitze.

Es ist wohl überflüssig, hieran die Bemerkung zu knüpfen, dass die seitherigen Ballonfahrten, wobei oft erstaunliche Distanzen in kurzer Zeit zurückgelegt wurden, nicht auf Eigenbewegung und selbstständiger Leitung beruhen, sondern auf dem Umstande, dass das Luftmedium, welches den Ballon einhüllt und festhält, in irgend einer Richtung fortströmt und den im Medium stillstehenden Ballon willenlos nach jener Richtung mit fortträgt. So kann auch ein Vogel, welcher in einem Käfige festgehalten ist, überall hingelangen, ohne dass er dorthin fliegt oder von der Stelle sich bewegt.

Vergleicht man den Luftwiderstand einer Kugel mit dem Widerstande eines Kegels, so findet man, dass, bei gleichem Durchmesser der Kugel und der Kegelsbasis, die beiderseitigen Widerstände dann einander gleich werden, wenn der halbe Winkel (α) an der Kegelspitze $20^{\circ} 40'$ misst. In diesem Falle beträgt nämlich der Kegelwiderstand ebenfalls so viel, als wenn man ein Drittel seiner Basisfläche oder der Kugel- fläche dem Luftstosse aussetzt.

Wenn kegelförmige Körper noch schärfer zugespitzt sind, so bieten sie auch noch geringere Widerstandsverhältnisse. Eine Zuspitzung mit zweimal $11^{\circ} 50'$ ergibt ein Widerstandsverhältniss von ein Fünftel der Basisfläche und eine Zuspitzung mit zweimal $5^{\circ} 50'$ ein Widerstandsverhältniss von ein Zehntel der Basisfläche. Die Zuspitzung eines Körpers ist also überhaupt ein Mittel, um dessen Luftwiderstand fast beliebig zu verringern. Da aber die schärfere Zuspitzung eine immer

zunehmende Verlängerung des Körpers bedingt, so wird es zuletzt schwierig, die Achse der Zuspitzung genau gegen die Luftbewegung einzustellen, und überdies macht sich bei verhältnissmässig sehr langen Körpern ausser dem eigentlichen Luftwiderstande eine von diesem wohl zu unterscheidende Seitenreibung geltend.

Auf der kegelförmigen Zuspitzung beruht in der Hauptsache auch der sehr geringe Stirnwiderstand, welchen ein fliegender Vogel zu überwinden hat. Wenn wir noch einmal auf eine fliegende Taube gewöhnlicher Sorte zurückkommen und deren Kopf mit gerade vorgestrecktem Schnabel und anschliessendem Hals nebst Brust und Leib betrachten, so erkennen wir einen Kegel, welcher den approximativen Zuspitzungswinkel von zweimal 8 Grad besitzt. Hiezu bilden die seitlich hervortretenden Flügelarme schneidige Keile, welche mit dem Winkel von zweimal 10 Grad zugeschärft sind. Die Rechnung zeigt, dass hiedurch bei der Fluggeschwindigkeit von 14·5 Secundenmeter sich ein Stirnwiderstand ergibt, welcher 11 Gramm beträgt und zu seiner fortdauernden Ueberwindung eine Arbeit von 0·159 Secundenmeter-Kilogramm beansprucht. Bei einer feiner gebauten Brieftaube wird der Stirnwiderstand wohl auch erheblich geringer sein.

Zwischen der Form einer Kugel und eines Kegels liegen noch viele andere Arten von Abrundung und Zuspitzung, welche den Stirnwiderstand eines Körpers gegen die Luft mehr oder weniger vermindern, z. B.

die elliptische und parabolische. Nach dem Vorhergehenden dürfte deren besondere theoretische Analyse in Hinsicht des Luftwiderstandes kaum mehr erforderlich sein. Eine aus verschiedenen Curven zusammengesetzte Zurundung nennt man allgemein die ogivale Form. Diese steht hauptsächlich dort in Anwendung, wo es sich darum handelt, dem gegen den Luftwiderstand zugespitzten Körper eine nicht allzu grosse Länge und Oberfläche zu geben, sondern ihm einen verhältnissmässig grossen Cubikinhalte zu sichern. Aus diesem Grunde sind in der Ballistik die weittragendsten Geschosse bei kurzer Länge cylindrisch-ogival zugrundet.

Da die Widerstandsverhältnisse in der Luft sich ähnlich wie jene im Wasser verhalten, so kann als Beispiel von ogivalen Formen auch das Vordertheil vieler Fischarten angeführt werden. Sehr vollkommen ist diese Form namentlich bei der schnellschwimmenden Forelle ausgebildet. Die gelungenste künstliche Nachahmung derselben finden wir bei dem Whitehead-schen Torpedo, nur mit dem nebensächlichen Unterschiede, dass dessen Querschnitt nicht länglich, sondern kreisrund gebildet ist. Hierbei ist mit einem möglichst grossen Cubikinhalte das erreichbare allergünstigste Widerstandsverhältniss vereinigt. Letzteres ergibt sich mit beiläufig ein Siebentel der grössten Querschnittsfläche.

Wieder zur Luft zurückkehrend, finden wir nun auch hier die Forellen- oder Torpedoform nachgeahmt.

Schon seit Erfindung des Luftballons, also seit einem Jahrhundert hat man sich fortwährend bemüht, der Ballonhülle zum Zwecke ihrer Vorwärtsbewegung gegen die Luft eine günstigere Gestalt als die einer Kugel zu verleihen. Unter der allgemeinen Bezeichnung „Cigarrenform“ wurden allerlei längliche Körper mit konischen, elliptischen und ähnlichen Zuspitzungen construirt, welche dem angestrebten Zwecke mehr oder weniger nahe kamen. Je länglicher aber die Ballonform und Zuspitzung ausfiel, desto mehr machte sich der Uebelstand geltend, dass das Verhältniss der Oberfläche, sowie des Gewichtes der Ballonhaut sich zum Gasinhalte und zu dessen Auftriebskraft verschlechterte. Je günstiger nämlich der Luftwiderstand, desto schwächer die Tragkraft für den Motor. Alle Versuche, welche von den bedeutendsten Ballontechnikern unternommen wurden, wie von Heinrich Giffard 1852, Dupuy de Lôme 1872, Paul Hænlein 1873, Albert und Gaston Tissandier 1883, führten nur zu zweifelhaften und jedenfalls für praktische Benützbarkeit unzulänglichen Resultaten. Den entschieden gelungensten Versuch producirten in neuester Zeit, nämlich im Jahre 1884, die Herren Charles Renard und Arthur Krebs, Capitäne in den französischen aëronautischen Werkstätten zu Meudon bei Paris. Indem sie der Ballonhülle die möglichst annähernde Gestalt einer Forellé, respective eines Fischtorpedos gaben und die Gondel sammt Antriebsapparaten in langgestreckter versteifter Form mit dem

Bauche des Ballonkörpers in fixe Verbindung brachten, haben sie ohne Zweifel diejenige Constructionsart wirklich gefunden, welche mit dem möglich geringsten Luftwiderstande die möglich grösste Tragkraft verbindet. Zudem brachten sie einen elektrischen Motor in Anwendung, welcher das günstigste bisher erreichte Verhältniss zwischen Gewicht und Leistungsfähigkeit darstellt.

Die Länge des Ballons war 50·4 Meter, sein grösster Durchmesser 8·4 Meter, die Fläche seines grössten Querschnittes 55·4 Quadratmeter, sein Cubikinhalt 1864 Cubikmeter und die Tragfähigkeit seiner Wasserstoffgasfüllung 2000 Kilogramm. Berechnet man für seine vordere ogivale Zuspitzung den Luftwiderstand aus den betreffenden Formeln, so findet man, dass derselbe ein Siebentel und mit Einbeziehung aller Anhängsel des Ballons annähernd ein Sechstel desjenigen Widerstandes beträgt, welcher der rechtwinkelig gestellten Fläche seines grössten Querschnittes zukäme. Hieraus entziffert sich seine wirksame Widerstandsfläche mit 9·2 Quadratmeter. Aus den Weglängen, welche der Ballon gegen die Luft zurücklegte, und den Zeiträumen, welche er hiezu verbrauchte, ergab sich seine Eigengeschwindigkeit mit $4\frac{1}{2}$ bis vielleicht 5 Secundenmeter. Berechnet man aus der Geschwindigkeit von $4\frac{1}{2}$ Secundenmeter den von dem Ballon zu überwindenden Luftwiderstand (bei dem Einheitsgewicht der Luft von 1·2 Kilogramm), so ergibt sich derselbe mit 22·8 Kilogramm, und aus der Geschwindigkeit von 5 Secunden-

meter mit 28·1 Kilogramm. Die zur fortdauernden Ueberwindung dieses Widerstandes erforderliche Betriebskraft entziffert sich dann mit 103 Secundenmeter-Kilogramm, beziehungsweise 141 Secundenmeter-Kilogramm, d. i. 1·4 bis 1·9 Pferdekkräfte. Die Motorbatterie besass nach der officiellen Angabe der Erfinder eine primäre Kraft von 250 Secundenmeter-Kilogramm. Schätzt man den Kraftverlust in der Maschine und in dem Apparate der Luftschaube auf je 25 Percent und zusammen auf 50 Percent, so verbleiben als wirklich thätiger Nutzeffect 50 Percent, d. i. 125 Secundenmeter-Kilogramm oder $1\frac{2}{3}$ Pferdekkräfte, so dass also zwischen Thatsache und Rechnung volle Uebereinstimmung besteht.

Wie gesagt ist die Renard-Krebs'sche Ballonconstruction unter allen, welche bisher versucht wurden, die vollkommenste, und es lässt sich nicht denken, wie bei einer bestimmten Tragkraft ein noch geringeres Widerstandsverhältniss erzwengt werden könnte. Aber gerade diese höchste Vollkommenheit eröffnet eine trübe Aussicht für die Zukunft des Ballonwesens. Die erreichte Eigengeschwindigkeit von circa 5 Secundenmeter ist gegenüber den gewöhnlich vorkommenden Luftströmungsgeschwindigkeiten, welche in höheren Luftschichten 10, 20 und mehr Secundenmeter betragen, so gering, dass dadurch die Möglichkeit, bestimmte Fahrrichtungen einschlagen zu können, keineswegs geboten wird. Es gelang den Erfindern Renard und Krebs mit äusserster Aufmerksamkeit und Vorsicht,

sowie von seltenem Glücke begünstigt, zweimal, zu ihren kurzen Versuchsfahrten eine totale Windstille zu benutzen, so dass sie mittelst der Eigengeschwindigkeit von 5 Secundenmeter zu ihrem Abfahrtsorte wieder zurückkommen konnten; sie haben auch die Hoffnung ausgesprochen, die Fahrtgeschwindigkeit später auf 10 Secundenmeter und mehr steigern zu können. Das Widerstandsgesetz zeigt jedoch, dass die Verdoppelung der Fahrgeschwindigkeit eine Vervierfachung des Luftwiderstandes und eine Verachtfachung des Bedarfes an Betriebskraft mit sich bringt. Es ist nicht abzusehen, wie die Tragfähigkeit des Ballons soweit gesteigert oder die Motormaschine bei gleichem Gewicht so weit verstärkt werden könnte, um einen achtfach stärkeren Antrieb vollführen zu können. Wollte man dem Renard-Krebs'schen Ballon vollends gar die Eigengeschwindigkeit eines Eisenbahnzuges, also mit 20 Secundenmeter, d. i. 72 Kilometer per Stunde verleihen, so würde sich der Luftwiderstand versechzehnfachen und der Bedarf an Antriebskraft auf das 64fache steigen, also statt der jetzigen $1\frac{2}{3}$, dann $106\frac{2}{3}$ Pferdekräfte betragen. Alles und Alles zusammengenommen dürfte die Furcht nicht unbegründet sein, dass die Renard-Krebs'sche, an sich höchst verdienstliche Errungenschaft weniger als der Anfang einer neuen gedeihlichen Luftschifffahrts-Aera, sondern vielmehr als der Abschluss der jetzt hundertjährigen, auf die Herstellung lenkbarer Luftballons gerichteten Bemühungen anzusehen sei. Man

muss daher auf weitere Versuche und Fortschritte in dieser Richtung sehr gespannt sein.

Hievon wird das andere, nämlich das sogenannte aviatische Gebiet der Flugtechnik, wobei der Drachen- und der Vogelflug das Vorbild ist, nicht berührt, und es wird Aufgabe der betreffenden Fachmänner sein, auf diesem Gebiete mit Hilfe der nun feststehenden Luftwiderstandsgesetze ihre Studien und Versuche mit vereinten Kräften zu concentriren.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien](#)

Jahr/Year: 1886

Band/Volume: [26](#)

Autor(en)/Author(s): Lössl Friedrich Ritter von

Artikel/Article: [Der Luftwiderstand im Allgemeinen und in seiner besonderen Beziehung auf Luftschiffahrt. 419-463](#)