

Ueber einen Luftwiderstandsapparat.

Von

Hans Zickendraht.

Mit überraschenden Erfolgen ist die Praxis der Theorie bei der Lösung des Flugproblem es vorausgeeilt und hat den Physiker an viele teilweise schon vor langem aufgestellte Fragen der Aerodynamik erinnert, welche immer noch ihrer endgültigen Beantwortung harren. Die Gesetze des Luftwiderstandes werden nun wohl in den Vorlesungen eine eingehendere Würdigung erfahren, als dies bisher der Fall war, und so dürfte der im folgenden beschriebene einfache Demonstrationsapparat manchem willkommen sein.

A. Der Apparat.¹⁾

Die Anregung zur Konstruktion des Apparates verdanke ich erstens einer Abhandlung von Herrn Prof. W. König²⁾, welcher auf der Frankfurter Ila (Internationale Luftschiffahrts-Ausstellung 1909) einen geistvoll erdachten Demonstrationsapparat vorführte und zweitens dem Studium der Arbeiten S. P. Langley's,³⁾ die so vieles für die Aviatik Beherzigenswertes enthalten.

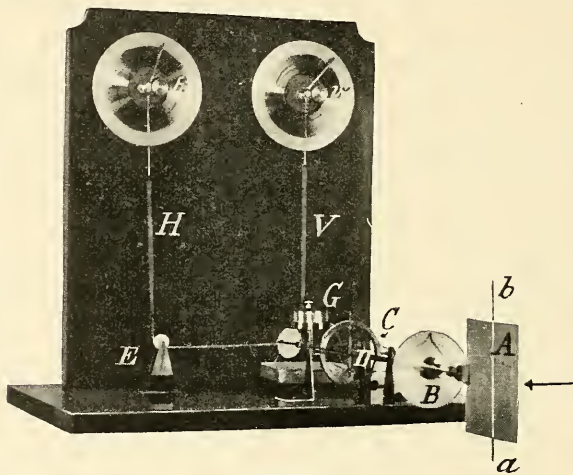
Dem in Figur 1 wiedergegebenen Apparate liegt dieselbe Idee zugrunde, die Langley bei seinem Gesamtdruckmesser (resultant pressure recorder) verwendet. Der Auftrieb (Vertikalkomponente) und der Rücktrieb (Horizontalkomponente des Druckes) einer unter bestimmtem Winkel gegen den Luftstrom geneigten Platte A, wird durch zwei kalibrierte Schraubenfedern H und V kompensiert, indem durch passendes Spannen dieser Federn die durch den Luftstrom abgelenkte Platte wieder in die Gleichgewichtslage zurückgeführt wird. Um diese Kompensation ausführbar zu machen, sitzt die Platte A, deren Luftstosswinkel an der Skala B abgelesen werden kann, am Ende eines durch die kardanische Aufhängung C allseitig beweglich gemachten Hebels D. Das hintere Ende dieses

¹⁾ Die Konstruktion des Apparates ist der Firma Fr. Klingelfuss & Co. in Basel übertragen worden.

²⁾ W. König. Wochen-Rundschau der Ila (1909), Heft 10, p. 169.

³⁾ S. P. Langley. Experiments in aerodynamics. Smithsonian contributions to knowledge, 1891.

Hebels durchsetzt das vertikale Brett und läuft in eine feine Spitze aus. Dieser Spitze steht in der Gleichgewichtslage eine zweite am Grundbrette befestigte Spitze gegenüber und liefert so einen Null-Index für die Kompensation sowohl der horizontalen als auch der vertikalen Ablenkung der Platte A durch den Luftstrom. Die gemeinsame Ansatzstelle der beiden Kompensationsfedern liegt einige Zentimeter vor der runden Oeffnung im vertikalen Brette. Dünne Fäden, von denen der eine um die Rolle E geführt ist, verbinden den Hebel D mit den Federn H und V. Das Anspannen der letzteren geschieht, indem durch Drehen der Knöpfe h und v der die Federn tragende Faden sich auf einen Zylinder aufwickelt. An den beiden Skalen können dann die Spannungen der Federn



Figur 1.

in Skalenteilen und nach passender Aichung direkt die Grössen der Druckkomponenten in Grammen abgelesen werden.

Die Ausführung einer Messung ist nun kurz folgende: Nach Einsetzung einer Platte A in ihre Fassung bringt man den Hebel D durch passende bei G aufgelegte Gewichte sowie durch Regulieren der Federn H und V in seine Nullage, wobei die beiden obenerwähnten Spitzen einander genau gegenüberstehen müssen. Wenn die Platte A nun unter einem bestimmten an B abzulesenden Winkel zum Luftstrome, der von rechts her kommend gedacht sei, geneigt ist, so wird sie einen Auftrieb und einen Rücktrieb erleiden und es können diese beiden Komponenten durch Drehen der Knöpfe h und v bis zum Wiedereinspielen der Spitzen kompensiert werden. Denkt man sich die beiden Komponenten in einem Punkte der Mittellinie a—b der Platte A angreifend, so wird, wenn für kon-

stanten Abstand der Linie a—b vom Kardan C, also für gleichbleibenden Hebelarm, gesorgt wird,⁴⁾ eine einmalige Aichung der Skalen H und V für mehrere Versuchsreihen genügen. Die Aichung geschieht direkt mit Hilfe von Gewichtstücken, auf einer leichten Schale, die man unter Verwendung von Faden und leichtgehender Friktionsrolle an einem kleinen im Mittelpunkt der Platte A angebrachten Ringe einmal im Sinne der Vertikalkomponente, das andere mal horizontal angreifen lässt. (In Ermangelung einer leicht genug laufenden Friktionsrolle habe ich mir aus 1 mm starkem Messingdraht leichte Räder mit 4 Speichen von ca. 10 cm Durchmesser hergestellt, deren Achsen auf Glasplättchen spielten und die bei richtiger Ausbalanzierung gute Dienste leisteten.)

Den Luftstrom erzeugte ein kleiner Elektromotor, welcher auf seiner Achse einen 4flügeligen Ventilator trug. Die Flügel des Ventilators liefen in einem Blechzylinder von 35 cm Durchmesser, der in seinem Vorderteile durch Querwände in 16 Fächer eingeteilt war, um eine Schraubenbewegung des Luftstromes zu verhindern. Ein Blechkonus von 40 cm Länge, der sich von 35 cm Durchmesser auf 25 cm Durchmesser verjüngte, konzentrierte den Luftstrom etwas. Bei allen Versuchen befand sich die Platte in 40 cm Abstand von der Mündung des Blechkonus.

Mittels eines kleinen Schalenkreuz-Anemometers der Firma Fuess wurde jeweils die Messung der Luftgeschwindigkeit ausgeführt. Es zeigte sich dabei, dass der Ventilator leider nicht gleichmässig arbeitete, ein Umstand, der allerdings die Messungen etwas erschwerte und gewisse Vorsichtsmassregeln erforderte. So wurde zur Kontrolle etwaiger Schwankungen der Luftgeschwindigkeit ein kleines Pendelanemometer in eine Kammer des grossen Ventilatorzylinders eingeführt, welches dann die Abweichungen erkennen und berücksichtigen liess. Wenn ich im folgenden dennoch Messungen mit dem Apparate angebe, so geschieht dies in der Hauptsache, um die Verwendbarkeit des Luftwiderstands-Apparates darzutun; ich bin mir dabei der Mängel der Resultate, die aus den etwas ungenügenden Hilfsmitteln (besonders bei dem improvisierten Ventilator) entsprangen, recht wohl bewusst.

B. Versuche.

1. *Der Druck auf eine zum Luftstrom senkrecht gestellte Fläche.* Wenn F die Oberfläche der Platte in Quadratmetern, v die Geschwindigkeit des Luftstromes in Metern pro Sekunde darstellt,

⁴⁾ Der Hebel D ist zweckmässig so einzurichten, dass durch Ausziehen der Fassung der Abstand der Achse a—b vom Cardan für verschiedene Platten konstant bleibt.

so gilt unter Annahme des vielfach bestätigten Newtonschen Quadratgesetzes⁵⁾ für den Druck auf die Fläche die Beziehung

$$P_{90^\circ} = k \cdot F \cdot v^2$$

wo k den „spezifischen Luftwiderstand“ (also den Druck in kg auf den Quadratmeter bei der Geschwindigkeit 1 m/sec) darstellt. Dieser Faktor k scheint nun keine Konstante zu sein, man vergleiche z. B. die vielen verschiedenen Resultate verschiedener Beobachter,⁶⁾ deren Angaben schwanken zwischen

$$k = 0,055 \text{ kg und } k = 0,144 \text{ kg}$$

Der erstere Wert ergibt sich aus der von Kirchhoff⁷⁾ abgeleiteten Gleichung für den Druck auf ein ∞ langes Rechteck, während der letztere Wert von Mannesmann⁸⁾ auf experimentellem Wege ermittelt wurde. Von einzelnen Beobachtern wurde auf die Abhängigkeit des Faktors k von der Flächengröße und -form aufmerksam gemacht, jedoch widersprechen sich die Angaben zuweilen direkt.⁹⁾ Eine wirkliche Lösung dieser verwickelten Fragen versprechen aber die schönen Versuche von Ahlborn,¹⁰⁾ welche deutlich die Wirbelbildung hinter der vom Flüssigkeitsströme getroffenen Fläche veranschaulichen und so erklären werden, warum Form und Grösse der Fläche von Einfluss auf den Faktor k sind.

Mit dem eingangs beschriebenen Apparate wurden untersucht: ein Quadrat, ein Kreis und ein Rechteck ($8,69 \times 11,5$ cm) von je $0,01 \text{ m}^2$ Oberfläche, die aus 1,5 mm dickem Aluminiumblech geschnitten waren.

Die Ergebnisse sind die folgenden:

Tabelle I.

	v m/s	k kg
Quadrat	2,684	0,066
Kreis	2,699	0,068
Rechteck	2,795	0,065

⁵⁾ Vergl. *S. Finsterwalder*, Aërodynamik. Encyclop. d. Math. Wiss., Bd. IV, 2, p. 161.

⁶⁾ *ibid.* p. 163.

⁷⁾ *G. Kirchhoff*. Vorlesg. üb. math. Physik, Bd. I, Mechanik, p. 307.

⁸⁾ *O. Mannesmann*. Inaug.-Diss., Tübingen 1898, p. 26.

⁹⁾ *ibid.* p. 27.

¹⁰⁾ *Fr. Ahlborn*. Physikal. Ztschr. XI, p. 201 (1910).

Die Werte von k scheinen hier recht gering; leider konnte ich mangels eines geeigneten Ventilators keine höheren Luftgeschwindigkeiten und auch keine grösseren Platten verwenden, um den Einfluss der Plattengrösse auf den Faktor k studieren zu können. Mannesmann¹¹⁾ wies ein mit der Flächengrösse proportionales Ansteigen von k nach; der Unterschied zwischen dem Quadrate, Kreise und Rechtecke gleichen Flächeninhaltes wie ihn von Lössl, F. Le Danteo und G. Hagen¹²⁾ konstatierten, lässt sich mit meinem Apparate erst bei höheren Geschwindigkeiten zeigen.

2. *Der Druck auf eine zum Luftstrome geneigte Fläche.* Der Uebergang vom Luftstosswinkel 90° zu kleineren Werten der Plattenneigung α gegenüber dem Luftstrome lässt sich darstellen durch die Gleichung

$$P_\alpha = P_{90^\circ} \cdot f(\alpha)$$

Die Funktion $f(\alpha)$ ist nun von vielen Forschern untersucht worden. Als unhaltbar müssen sich jedoch alle Ausdrücke für $f(\alpha)$ erweisen, die nicht für bestimmte α über den Wert 1 hinausgehen können, indem schon Dines,¹³⁾ Mannesmann und andere nachweisen konnten, dass für gewisse spitze Luftstosswinkel der Wert P_α grösser wie P_{90° werden könne. Dieses paradoxe Verhalten lässt sich auch mit meinem Apparate leicht nachweisen. Man bestimmt zu diesem Zwecke bei konstanter Luftgeschwindigkeit für verschiedene Neigungswinkel α die Werte H und V der Horizontal- und Vertikalkomponente, untersucht hierauf, ob die Bedingung

$$\frac{H}{V} = \operatorname{tg} \alpha$$

erfüllt sei, dann liefert $\sqrt{H^2 + V^2} = P_\alpha$

den gesuchten zum Luftstosswinkel α gehörigen Druckwert. Aus den Verhältnissen von P_α zu P_{90° ergibt sich dann unmittelbar der Verlauf der Funktion $f(\alpha)$

Ist die Bedingung $\frac{H}{V} = \operatorname{tg} \alpha$ nicht erfüllt, so muss folgende kleine Korrektur angebracht werden: Die Resultante

$$P'_\alpha = \sqrt{H^2 + V^2}$$

bildet dann einen kleinen Winkel β mit der Normalen zur Platte

und es ist $\operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \frac{H}{V} = C$

woraus $\beta = \frac{C - \operatorname{tg} \alpha}{1 + C \cdot \operatorname{tg} \alpha}$

¹¹⁾ O. Mannesmann loc. cit. p. 26.

¹²⁾ S. Finsterwalder. Aërodynamik, p. 162.

¹³⁾ W. Dines. Proc. Roy. Soc. of London, 48, 233 (1890). Vergl. auch F. W. Lanchester, Aërodynamik (Teubner 1909), Bd. I, p. 172.

Den wahren Druck findet man dann aus

$$P'_\alpha \cdot \cos \beta = P_\alpha$$

Tabelle II gibt die Mittelwerte aus 10 Messungsreihen an einer quadratischen Platte wieder. Zu jedem Luftstosswinkel ist der entsprechende Wert der Horizontalkomponente (Rücktrieb) und der Vertikalkomponente (Auftrieb) in gr. gegeben. In der vierten Zeile stehen die Werte des für den Aeroplan wichtigen Verhältnisses V/H . Die obenerwähnte Korrektur erwies sich im Falle der quadratischen Platte als unter den Versuchsfehlern liegend.

Tabelle II.

Quadrat von $0,01 \text{ m}^2$

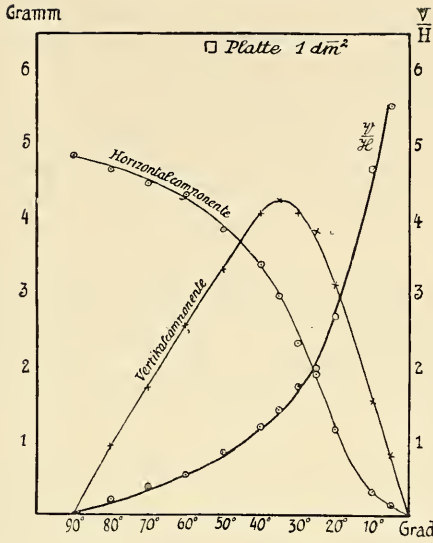
v ca. 2,7 m/s

Luftstoss- Winkel	90°	80°	70°	60°	50°	40°	35°	30°	25°	20°	10°	5°
H in gr .	4,87	4,67	4,50	4,35	3,87	3,40	2,96	2,34	1,93	1,16	0,33	0,15
V in gr .	—	0,94	1,72	2,57	3,32	4,08	4,27	4,09	3,85	3,11	1,55	0,83
V/H . .	—	0,20	0,38	0,59	0,86	1,20	1,44	1,75	2,00	2,68	4,67	5,53
P_α in gr.	4,87	4,76	4,81	5,05	5,09	5,31	5,19	4,71	4,31	3,32	1,58	0,84
$f(\alpha) = \frac{P_\alpha}{P_{90}}$	1	0,978	0,988	1,037	1,045	1,090	1,066	0,967	0,885	0,682	0,324	0,173

sodass sich P_α direkt aus $\sqrt{H^2 + V^2}$ bestimmte. Den Verlauf der Funktion $f(\alpha)$ gibt die letzte Zeile wieder und man erkennt leicht das Maximum in der Gegend von 40° . Dines¹⁴⁾ fand zwischen 35° und 40° ein scharf ausgeprägtes Maximum seiner Kurve für $f(\alpha)$, für welches die Versuche von Ahlborn¹⁵⁾ nun eine sehr einleuchtende Erklärung geben, indem bei diesen Neigungswinkeln der um die Platte seitlich abfließende Luft- resp. Flüssigkeitsstrom die Wirbel hinter der Platte teilweise zerreisst und so eine merkliche Druckverminderung im „toten Wasser“ hervorgerufen wird, der Gesamtdruck P_α also steigen muss.

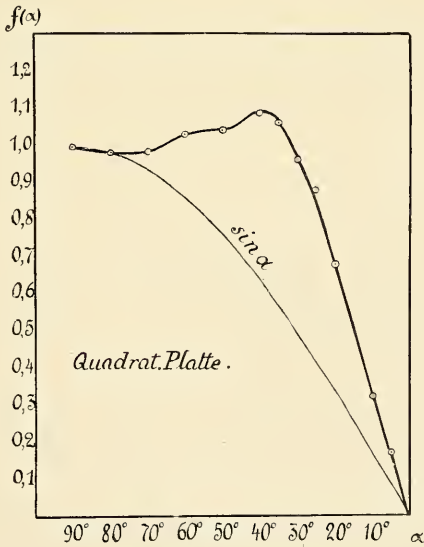
¹⁴⁾ W. Dines, loc. cit.

¹⁵⁾ F. Ahlborn, loc. cit., p. 203.



Figur 2.

Figur 2 stellt graphisch den Verlauf der beiden Druckkomponenten und des Verhältnisses V/H dar, während in Figur 3 die experimentell ermittelte Kurve für $f(\alpha)$ mit dem in der Flug-



Figur 3.



technik jetzt vielfach verwendeten v. Lössl'schen Sinusgesetze¹⁶⁾ verglichen ist. Nach der Stauhügeltheorie, die durch v. Lössl ausgebildet wurde, soll

$$f(\alpha) = \sin \alpha$$

sein. Ein Vergleich theoretischer und praktisch ermittelter Kurven für $f(\alpha)$ findet sich in Lanchesters Aerodynamik.¹⁷⁾ Dort ist auch die Dines'sche Kurve für die quadratische Platte gegeben, an welcher der charakteristische Höcker zwischen 30^0 und 40^0 Neigungswinkel auffällt. Dines verwandte Platten von dreieckigem Querschnitt, und man könnte versucht sein, diesen Umstand in irgend einer Weise für den eigenartigen Verlauf der Druckkurve verantwortlich zu machen. Lanchester schreibt später:¹⁸⁾ „Jedenfalls würde er befriedigender sein, wenn die Versuche mit Platten von gewöhnlicher Form wiederholt worden wären.“ Dass damit das Maximum bei ca. 40^0 Luftstosswinkel nicht verschwindet, ist nun in Figur 3 gezeigt.

Ausser dem Quadrate wurden noch der Kreis und das oben-erwähnte Rechteck bei verschiedenen Luftstosswinkeln untersucht, die Resultate sind in den Tabellen III und IV niedergelegt.

Tabelle III.

Kreis von $0,01 \bar{m}^2$

v ca. 2,7 m/s

Luftstoss- Winkel	90°	80°	70°	60°	50°	40°	35°	30°	25°	20°	10°	5°
H in gr .	4,93	4,55	4,61	4,50	4,05	3,57	3,10	2,55	1,86	1,25	0,41	0,22
V in gr .	—	0,80	1,84	2,51	3,32	4,17	4,34	4,27	3,84	3,12	1,17	0,73
V/H . .	—	0,17	0,40	0,56	0,82	1,17	1,40	1,67	2,06	2,49	2,85	3,32
P_α in gr .	4,93	4,62	4,96	5,15	5,23	5,49	5,33	4,97	4,26	3,36	1,24	0,76
$f(\alpha) = \frac{P_\alpha}{P_{90}}$	1	0,937	1,006	1,044	1,061	1,114	1,081	1,008	0,864	0,682	0,250	0,151

Zu Tabelle III ist noch zu bemerken, dass an den zwei letzten Werten von P_α die früher erläuterte kleine Korrektur angebracht werden musste. Auch beim Kreise zeigt die Funktion $f(\alpha)$

¹⁶⁾ F. v. Lössl. Die Luftwiderstandsgesetze. Wien 1896.

¹⁷⁾ F. W. Lanchester. Aërodynamik, p. 172, Fig. 93.

¹⁸⁾ ibid. p. 291.

das charakteristische Maximum in der Gegend von 40° Luftstosswinkel.

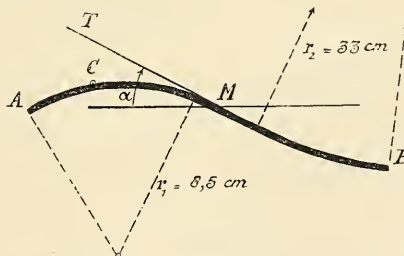
Tabelle IV enthält schliesslich dieselben Angaben für eine rechteckige Platte von $0,01 \text{ m}^2$ Fläche, deren lange Kante $11,5 \text{ cm}$ horizontal lag. Auch hier sind die beiden letzten Werte von P_α korrigiert. Das Maximum von $f(\alpha)$ findet sich bei 35° .

Tabelle IV.

Rechteck ($8,69 \times 11,50 \text{ cm}$) $0,01 \text{ m}^2$ v ca. $2,7 \text{ m/s}$

Luftstoss- Winkel	90°	80°	70°	60°	50°	40°	35°	30°	25°	20°	10°	5°
H in gr .	4,42	4,41	4,17	4,13	3,66	3,11	2,80	2,44	1,96	1,32	0,48	0,27
V in gr .	—	0,81	1,52	2,42	3,04	3,55	3,92	4,02	3,90	3,16	1,47	0,68
VH . .	—	0,18	0,36	0,59	0,83	1,14	1,40	1,65	1,99	2,39	3,06	2,52
P_α in gr .	4,42	4,48	4,44	4,78	4,76	4,72	4,82	4,70	4,36	3,42	1,52	0,70
$f(\alpha) = \frac{P_\alpha}{P_{90}}$	1	1,001	1,001	1,081	1,077	1,068	1,095	1,063	0,986	0,774	0,344	0,158

Der Messapparat lässt sich auch erfolgreich zum Studium gekrümmter Flächen anwenden, wie zum Schlusse an einem einfachen Beispiele gezeigt werden soll. In Figur 4 ist der Durchschnitt einer Fläche dargestellt, wie sie beim Bau von Aeroplanen Verwendung findet.



Figur 4.

Dieser Querschnitt stellt ein liegendes S dar, dessen beide Haupt-Krümmungsradien ungefähr $8,5 \text{ cm}$ und 33 cm betragen. In der Mittellinie M der Fläche, die den Wendepunkt der Quer-

schnittkurve darstellt, werde die Tangentialebene T an die Fläche gelegt und als Luftstosswinkel α der Winkel zwischen der Tangente an die Querschnittskurve und der Horizontalen angenommen, es lässt sich dann leicht zeigen, dass für $\alpha = 53^\circ$ die Fläche parallel der Tangente in A und für 8° die Fläche parallel der Tangente in B getroffen wird. Die Tabelle V gibt nun Aufschluss über die Frage nach demjenigen Luftstosswinkel, bei welchem der Quotient V/H am grössten wird.

Tabelle V.

Aeroplanfläche $0,022\text{m}^2$

Luftstosswinkel	60°	53°	50°	40°	30°	20°	10°	8°
H in gr	11,25	9,25	8,21	5,32	3,07	1,70	1,18	1,14
V in gr	12,62	12,62	12,0	10,0	6,85	2,63	0,96	0,35
V/H	1,12	1,37	1,46	1,88	2,23	1,55	0,81	0,31

Dies ist für $\alpha = 30^\circ$ der Fall und man erkennt ein für den Aeroplan wichtiges und längst praktisch verwertetes Prinzip, demzufolge die Fläche so gestellt werden muss, dass ihr höchster Punkt nicht in der Vorderkante, sondern etwas hinter derselben zu liegen kommt. In unserm Falle ist die Stelle C in ca. $\frac{1}{6}$ der Gesamtlänge als höchster Punkt zu wählen.

Physikal. Anstalt der Universität Basel.

März 1910.

Eingegangen 3. Mai 1910.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft zu Basel](#)

Jahr/Year: 1910

Band/Volume: [21_1910](#)

Autor(en)/Author(s): Zickendraht Hans

Artikel/Article: [Ueber einen Luftwiderstandsapparat 42-50](#)