

Zeitschrift: Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 92 (1909)

Artikel: Die Aerodynamik als Grundlage der Luftschiffahrt

Autor: Finsterwalder, S.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-90173>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 07.06.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Aerodynamik als Grundlage der Luftschiffahrt.

Von

S. Finsterwalder,

Professor an der technischen Hochschule in München.

Als vor bald 25 Jahren das Renard'sche Luftschiff „La France“ seinen ersten Kreis beschrieb und damit den Beweis der Lenkbarkeit erbrachte, fand dieses Ereignis vergleichsweise wenig Beachtung; heute, nach den Fahrten Zeppelins und dem Fluge Blériots über den Kanal, wittert alle Welt den Beginn einer neuen Zeit und nur Rückständige zweifeln noch an der endgültigen Eroberung der Luft. Woher kommt dieser Umschlag? Sind neue Kräfte entdeckt oder unerwartete Kombinationen bekannter ersonnen worden, um jene Erfolge zu erzielen, die das Vertrauen und die Hoffnungen weiter Kreise auf eine unabsehbare Reihe neuer Errungenschaften nähren? Nichts von alledem. Es liegt mir ferne, den Gründen nachzugehen, die den Glauben an eine Zukunft der Luftschiffahrt erweckt haben, ich will mich begnügen, von jenen Dingen zu reden, die die wirklichen Fortschritte angebahnt haben. Zu diesen sind zweifellos in erster Linie die Erfahrungen im Bau leichter Explosionsmotoren zu rechnen, wie sie uns die Automobiltechnik in reichstem Masse geliefert hat. Erinnern wir uns daran, dass vor 25 Jahren ein Motor, damals natürlich eine Dampfmaschine mit 75 kg Gewicht für die Pferdekraft noch als ungewöhnlich leicht galt. Die Flugtechniker jener Zeit träumten von einer ideal leichten Maschine, die 10 kg für die Pferdekraft wiegt, und die Erfüllung ihrer Hoffnungen bringen könnte. Noch vor fünf Jahren rechneten ernste, aber von den Fortschritten der Technik voll überzeugte Männer mit 5 kg als Mindest-

gewicht eines dauernd betriebsfähigen Motors und heute sind wir bereits unter der Hälfte davon angelangt. Das technische Prinzip, welches diesen Fortschritt erzielte, heisst: „Schnellbetrieb.“ Mit der Erhöhung der Umdrehungszahl der Motoren geht bei gleicher Arbeitsleistung eine Verminderung der übertragenen Kräfte und eine Verkleinerung der Abmessungen der übertragenden Organe Hand in Hand. Entstehen dabei auch infolge der grossen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen neue Beanspruchungen des Materiales, so kann diesen doch bei der Kleinheit der bewegten Massen durch geeignete Anordnung der bewegten Teile und Verwendung des edelsten Baustoffes wirksam begegnet werden. In bezug auf die Erleichterung der Motoren sind wir heutzutage schon annähernd an der Grenze der Wünsche angelangt und es liegt augenblicklich viel näher, an eine Einschränkung des Benzinverbrauches, der bei den ganz leichten Motoren noch 0,4 kg in der Pferdekraftstunde beträgt, zu denken, als an weitere Erleichterung des Motorgewichtes.

Die ersten augenfälligen Erfolge in der Luftschiffahrt sind so durch einen Überaufwand von konzentrierter Motor-kraft errungen worden; dieser hat mit dem kaum minderen Aufwand an moralischer und finanzieller Energie der neuen Bewegung einen heroischen Zug verliehen, der die Popularität ihrer Vertreter mächtig fördert. Dem gegenüber sind die Fragen, die in der vorausgegangenen, vergleichsweise kleinlichen Vorbereitungszeit fast allein die kleine Gemeinde der für die Luftschiffahrt Strebenden und Begeisterten beschäftigten, in den Hintergrund getreten. Es sind das die Fragen der Aerodynamik, deren Bedeutung für die Luftschiffahrt zwar niemals in Zweifel stand, die aber in dem Masse Beachtung gewinnen, als wirtschaftliche Erwägungen sich geltend machen und es nicht mehr angeht, bloss Rekorde in Flugdauer und Geschwindigkeit zu schaffen. Diesen aerodynamischen Fragen wollen wir unsere Aufmerksamkeit widmen.

Die Probleme, welche dabei in erster Linie zu erledigen sind, betreffen das Verhalten der Körper in freier Luft. Zumeist haben wir es mit starren Körpern unter dem Einfluss der Schwerkraft zu tun. Zu der Schwere tritt die Wirkung des Luftwiderstandes, die von der Form und der Bewegung des Körpers abhängt. Wir setzen voraus, dass die Luft in grösserer Entfernung vom Körper ruht oder gleichförmig bewegt ist.

Freilich trifft das nicht immer, ja besser gesagt niemals zu. Auch grosse Luftmassen, die gegenüber den Abmessungen eines Luftfahrzeuges als unendlich gelten können, sind namentlich in der Nähe des Erdbodens häufig als Ganzes in beschleunigter oder verzögerter Bewegung. Im Kleinen ist die Luft in der Regel voll turbulenter Bewegung, die man als innere Unruhe des Windes bezeichnet hat und in dem Wirbeln der Schneeflocken oder Sonnenstäubchen einen sinnentfälligen Ausdruck findet. Im Interesse der Einfachheit der Grundlagen müssen wir trotzdem davon absehen und nehmen zudem an, dass es für den Luftwiderstand gleich ist, ob sich die Luft gegen den Körper oder umgekehrt der Körper gegen die Luft bewegt.

Der Bewegungszustand des Körpers gegen die in grosser Entfernung ruhende Luft ist dann, soweit er in der Geschwindigkeit zum Ausdruck kommt, durch die Fortschreitungs- und Drehgeschwindigkeit des Schwerpunktes und eine Drehgeschwindigkeit um eine durch den Schwerpunkt gehende Achse gegeben. Auch die augenblickliche Beschleunigung des Körpers gegen die Luft liesse sich durch eine Beschleunigung des Schwerpunktes und eine Drehbeschleunigung um eine weitere Achse durch den Schwerpunkt ausdrücken. Wir nehmen jedoch ausdrücklich an, dass die auftretenden Beschleunigungen so gering sind, dass sie den Luftwiderstand nicht mehr beeinflussen.

Wir schliessen damit freilich zitternde oder auch rasch drehende Bewegungen des Körpers aus den allgemeinen Überlegungen aus.

Die Wirkung des Luftwiderstandes auf den Körper kann nun unter zweierlei Gesichtspunkten aufgefasst werden, entweder als Gesamtwirkung auf den ganzen Körper oder als Summe von Teilwirkungen auf die einzelnen Elemente der Oberfläche. Die Gesamtwirkung, welche bei Fragen nach der Tragfähigkeit und nach dem Arbeitsaufwand zuerst in Betracht kommt, ist immer durch eine am Schwerpunkt des Körpers angreifende Kraft und ein dazu gehöriges Drehmoment bzw. Kräftepaar darstellbar und die grundlegende Fragestellung nach dem Gesamtwiderstand lautet daher: Wie hängen die im Schwerpunkt angreifende Kraft des Luftwiderstandes und das dazu gehörige Drehmoment von der Geschwindigkeit des Schwerpunktes und der dazu gehörigen Winkelgeschwindigkeit des Körpers ab? Wie verwickelt dieses Problem ist, geht daraus hervor, dass es die Abhängigkeit der sechs Komponenten der Kraftschraube des Luftwiderstandes von den sechs Komponenten der Bewegungsschraube des Körpers in sich schliesst.

Die Frage der Teilwirkungen des Luftwiderstandes auf die einzelnen Oberflächenelemente des Körpers ist für die Beurteilung der Festigkeit bzw. der Beanspruchung des Körpers durch den Luftwiderstand und die Stabilität der durch den Luftwiderstand beeinflussten Bewegung von Bedeutung; ausserdem liegt in ihr der Schlüssel des tieferen Verständnisses des Luftwiderstandes. Es ist klar, dass beide Fragen ohne eine vorausgehende Theorie des Luftwiderstandes nicht gelöst werden können, und wenn wir auch, wie wir bald sehen werden, von einer voll befriedigenden Theorie des Luftwiderstandes etwa im Sinne der Maxwellschen Theorie der Elektrizität und des Magnetismus noch weit entfernt sind, müssen wir eben mit einer unvollkommenen vorlieb nehmen und an ihrer Hand das Tatsachenmaterial ordnen.

Die erste und bis etwa 1870 unbestrittene Theorie des Luftwiderstandes stammt von Newton. Er dachte sich die gegen den Körper anströmende Luft ersetzt durch einen

Hagel parallel fliegender Geschosse, die auf der Oberfläche des Körpers aufprallen, daran abgleiten, und deren Stosswirkung den Luftwiderstand ausmacht. Aus dieser anschaulichen Vorstellung ergeben sich ungezwungen eine Reihe von Gesetzen, die durch die Erfahrung ohne weiteres bestätigt werden, nämlich: 1. die Abhängigkeit des Luftwiderstandes vom Quadrat der Geschwindigkeit. Es nimmt eben sowohl die Zahl der Geschosse, als auch die Stosswirkung des einzelnen mit der Geschwindigkeit zu; 2. die Abhängigkeit von der Luftdichte; 3. die Abhängigkeit von dem Hauptspant des Körpers oder von der Projektion des Körpers auf eine Ebene senkrecht zum Luftstrom. Ausserdem liess die Vorstellung Raum für die Einführung einer sogenannten Oberflächenreibung des Luftstromes und endlich hatte sie den grossen theoretischen Vorteil, dass sie die Einzelwirkung auf jedes Flächenelement unabhängig von den übrigen zu berechnen gestattete; diese hängt nämlich bloss von der Stellung desselben gegen den Luftstrom ab und ist dem Sinusquadrat des Stosswinkels proportional, sie steht ausserdem bei Vernachlässigung der Reibung senkrecht auf dem Flächenelement. So gibt diese Theorie für jede auftauchende Fragestellung unmittelbar einen mathematischen Ansatz und den Weg zur Lösung. Demgegenüber wollen die auf der Hand liegenden Mängel der Newtonschen Auffassung zunächst wenig bedeuten. Diese sind in der Unmöglichkeit begründet, sich eine bestimmte Vorstellung über das weitere Verhalten der Geschosse nach ihrer Stosswirkung zu machen oder die Art und Weise zu verfolgen, wie sie schliesslich den Raum hinter dem Körper ausfüllen und auf die Rückseite desselben wirken.

Es haben auch nicht diese Mängel das Schicksal der Newton'schen Theorie, die nun ziemlich allgemein verlassen ist, besiegelt, sondern der Widerspruch mit unleugbaren Tatsachen, insbesondere des Vogelfluges.

Dieser Widerspruch äusserte sich drei verschiedenen Weisen. 1. verlangt die Newton'sche Theorie einen unnatür-

lich grossen Arbeitsaufwand zum Fliegen. Dieser besteht nämlich aus zwei getrennten Teilen, der Schwebearbeit und der eigentlichen Flugarbeit. Erstere wäre nach der Newtonschen Theorie gleich dem Produkt aus dem Gewicht des Flugkörpers und der Grenzggeschwindigkeit, die der senkrecht fallende Flugkörper unter dem Einfluss von Schwere und Luftwiderstand erlangt. Diese Schwebearbeit wäre sonach unabhängig von der Fluggeschwindigkeit und würde beispielsweise bei einem Storch von 4 kg Gewicht und $0,5 \text{ m}^2$ Flügelfläche schon eine halbe Pferdekraft betragen. Dazu käme noch die mit der 3. Potenz der Geschwindigkeit wachsende Flugarbeit. 2. ist nach der Newtonschen Theorie der Luftwiderstand ebener Flächen auch bei schieferm Luftstoss unabhängig von der Form ihres Umrisses, während doch die Erfahrung lehrt, das beispielsweise langgestreckte Rechtecke, wenn sie an der Schmalseite angeblasen werden, ungleich weniger Luftwiderstand erfahren, als wenn dies an der Langseite geschieht. Diese für die Flugtechnik bedeutungsvolle Tatsache wurde zuerst von dem Engländer Wenham i. J. 1866 ausgesprochen. 3. müsste die Resultante des Luftwiderstandes ebener Flächen nach Newton stets durch den Schwerpunkt gehen, während sie in Wirklichkeit bei schieferm Stoss beträchtlich gegen die angeblasene Kante vorrückt, ähnlich wie es das Avanzinische Gesetz beim Wasserstoss verlangt.

Dazu kommt, dass für ebene Flächen die nach der Newtonschen Grundanschauung abgeleitete Abhängigkeit des Luftwiderstandes vom Sinusquadrat des Luftstosswinkels mit der Erfahrung nicht stimmt, und so liess sich die lange festgehaltene Grundlage der Aerodynamik nicht länger verteidigen.

Man sah sich genötigt, die Luft als elastische Flüssigkeit aufzufassen, was in der Physik, insbesondere in der Aerostatik längst gang und gäbe war, und in der Lehre vom Luftwiderstande bisher nur aus dem Grunde der Rechenschwierigkeit vermieden worden war. Euler hat

bekanntlich die Differentialgleichungen einer bewegten Flüssigkeit in zwei Formen aufgestellt und damit eine neue freilich weniger bequeme Grundlage für die Aerodynamik geschaffen. Dabei liegt folgende Auffassung zugrunde: Jedes abgegrenzte Flüssigkeitsquantum erfährt eine doppelte Beschleunigung, einmal durch äussere Kräfte wie die Schwere und ausserdem durch die in der Flüssigkeit herrschende Druckverteilung in der Richtung des Druckgefälles. Daneben muss die Kontinuität gewahrt bleiben, d. h. das Quantum muss auch bei der durch die Beschleunigungen abgeänderten Bewegung den ihm dadurch zugewiesenen Raum ausfüllen und seine Dichte dementsprechend abändern. Zusammen mit dem Gesetz, das Dichte und Druck verbindet, bestimmen diese Forderungen den zeitlichen und örtlichen Verlauf der Bewegung und Druckänderung, sobald noch festgesetzt wird, was an den Grenzen der Flüssigkeit geschieht, z. B. dass sie an den festen Körpern (reibungslös) entlang gleitet. Ein in die Flüssigkeit getauchter Körper wird allseitig von ihr umspült und der in ihr herrschende Druck überträgt sich senkrecht auf dessen Oberfläche. Auf diese Weise kommt die Wechselwirkung von Körper und Flüssigkeit zustande, die das Wesen des Luftwiderstandes ausmacht. Dieser Luftwiderstand ist — im Gegensatz zur Newtonschen Auffassung — abhängig von der Beschleunigung des Körpers. Nimmt man den einfachen Fall einer stationären Bewegung, so fällt der Einfluss der Beschleunigung fort und dann zeigt sich, dass die auf den Körper senkrecht übertragenen Druckkräfte, von einer wichtigen, später zu besprechenden Ausnahme abgesehen, wohl noch ein Drehmoment aber keine Resultante mehr besitzen; ein solches Medium würde also — aller Erfahrung zum Trotz — keinen Widerstand gegen das gleichförmige Verschieben ausüben, sondern nur den Körper zu drehen bestrebt sein. Im übrigen würde sich die Abhängigkeit des geweckten Luftwiderstandes von der Form und dem Bewegungszustand insofern verhältnismässig einfach ergeben, als diese Abhängigkeit nur eine

endliche Zahl (bei einem Körper beliebiger Form immerhin noch 15) von Parametern enthält und daher durch eine endliche Zahl von Versuchen zu bestimmen wäre. Die rein rechnerische Ermittlung dieser Parameter, obwohl prinzipiell möglich, ist praktisch undurchführbar. So leistet also der Eulersche Ansatz, dessen Folgerungen für unser Problem hauptsächlich Kirchhoff gezogen hat, auch wenn alle analytischen Schwierigkeiten überwunden wären, nicht das, was von ihm zu erwarten ist. Durch Einführung der inneren Reibung im Sinne von Stokes kommt man nicht viel weiter, da durch sie wohl eine der konstanten Bewegung widerstehende Kraft herauskommt, die aber weder vom Quadrat der Geschwindigkeit abhängt, noch mit dem Querschnitt des Körpers proportional wächst. Trotzdem lässt sich der Eulersche Ansatz so abändern, dass er mit den empirischen Gesetzen des Luftwiderstandes in Einklang zu bringen ist. Das ist Helmholtz durch Einführung der Diskontinuitätsflächen gelungen. Man muss nur die bisher implizit festgehaltene Forderung aufgeben, dass benachbarte Luftteilchen immer benachbarte Geschwindigkeit haben und zulassen, dass längs gewisser Flächen, die von der Oberfläche des Körpers fahnenartig abzweigen, endliche Geschwindigkeitsdifferenzen vorkommen. Die Einführung solcher Flächen ist schon darum notwendig, weil das einfache Umfliessen des Körpers an allen Kanten und Ecken der Oberfläche unendliche grosse Geschwindigkeiten zur Folge hätte, die sich in unbegrenzter Verminderung des Druckes an solchen Stellen und in darauffolgender Lösung des Zusammenhanges der Flüssigkeit äussern würde. Das wirkliche Vorkommen solcher Diskontinuitätsflächen lässt sich auf experimentellem Wege nachweisen. Es sind das aber äusserst instabile Gebilde, welche flatternden Fahnen gleichen, die sich bald an die Oberfläche des Körpers anlegen, bald sich von ihr entfernen, wobei sie eine ganz unregelmässige Bewegung des Mediums auf der Rückseite des Körpers einleiten, deren lebendige Kraft schliesslich in zahllose Wirbel umgesetzt

und in Wärme verwandelt wird. Während die lebendige Kraft der Strömung eines durch die ursprünglich ruhende Luft gleichförmig gezogenen und von ihr stetig umflossenen Körpers nur *einmal* bei Beginn der Bewegung erzeugt wird und dann dauernd erhalten bleibt, so dass kein weiterer Aufwand an Arbeit zur Fortbewegung mehr erforderlich ist, wird bei diskontinuierlicher Bewegung, auch wenn sie gleichmässig erfolgt, *andauernd* wirbelnde oder mindestens neubewegte Luft erzeugt, deren Bewegungsenergie, ohne dass sie sich in Druck umsetzt, infolge innerer Reibung gebremst wird. Dementsprechend findet bei stetig umflossenen Körper kein Bewegungswiderstand statt, wohl aber bei unstetig umflossenen und zwar umsomehr, je mehr Wirbel nutzlos erzeugt werden. Auf solche Weise lässt sich das Auftreten des Luftwiderstandes und die Zunahme mit dem Quadrat der Geschwindigkeit an einem mit Ecken und Kanten behafteten Körper aus der von Helmholtz modifizierten Eulerschen Theorie erklären. Neuerdings hat nun Prandtl (Ueber Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. Heidelberger Kongressverhandl. 1904, S. 484) die Bildung von Diskontinuitätsflächen auch an gerundeten Körpern, an denen die stationäre Strömung nirgends unendliche Geschwindigkeit aufweisen würde, plausibel gemacht und damit das Auftreten eines Widerstandes auch in solchen Fällen theoretisch gerechtfertigt. Er nimmt dabei an, dass die innere Reibung der Luft nur an der Körperoberfläche und an Diskontinuitätsflächen mit endlicher Geschwindigkeitsdifferenz auf beiderlei Seiten zu berücksichtigen sei. Die an der Oberfläche des Körpers haftende, wenig bewegte Schicht wird von den Stellen höheren Druckes an der Stosseite des Körpers allmählich gegen jene niederen Druckes an den Flanken getrieben und folgt willig der damit verbundenen Beschleunigung. Sobald diese Schicht aber beim Übergang von den Flanken gegen die Rückseite des Körpers wieder an Stellen höheren Druckes gerät und einer Verzögerung unterliegt, weicht sie seitlich aus und gibt Anlass zum

Auftreten einer in die Strömung eingreifenden Diskontinuitätsfläche mit den schon erörterten Folgen für den Luftwiderstand. Gleichzeitig mit der dabei eintretenden Änderung des Bewegungszustandes auf der Rückseite des Körpers vermindert sich dort der Druck gegenüber dem Betrag, den er beim glatten Umfliessen erreichen würde und es entsteht der den Luftwiderstand erzeugende Drucküberschuss auf der Vorderseite des Körpers.

Fassen wir nochmals zusammen, was auf Grund der Eulerschen Hypothese im Zusammenhang mit einer ziemlichen Dosis von Erfahrungstatsachen über das Verhalten der Luft gegenüber gleichförmig bewegten Körpern zu sagen ist. Die zuströmende Luft wird an der Vorderseite des Körpers gestaut, sie verliert an Geschwindigkeit und gewinnt an Druck, der sich auf den Körper überträgt. An gewissen Stellen ist die Luft gegenüber dem Körper in Ruhe. Dort tritt der grösste Druck auf; dort teilt sich die Luft und umfliesst den Körper, wobei die Geschwindigkeit über das Mass der ursprünglichen wächst und der Druck unter den der unbewegten Luft sinkt. Je nach der mehr oder minder glatt verlaufenden Form tritt auf der Rückseite des Körpers ein verschieden ausgedehnter Schweif von unregelmässig bewegter Luft auf, der sich hinten zuspitzt und allmählich wieder in den regelmässig bewegten Luftstrom einordnet. An den Stellen, wo der Schweif an den Körper grenzt, herrscht gegenüber der Vorderseite variabler Unterdruck, der mit dem Überdruck auf der Vorderseite den Hauptteil des Luftwiderstandes ausmacht. Neben diesem geht eine mehr nebensächliche Oberflächenwirkung, also eine in jedem Flächenelement wirkende parallel zur Tangentialebene gerichtete Kraft einher, die zum Teil der Luftreibung im engeren Sinne, zum grösseren Teil aber der an den Unebenheiten der Oberfläche unterhaltenen Turbulenz der benachbarten Luftschichten ihre Anregung verdankt.

Wie unsicher und unvollständig auch diese theoretische Grundlage erscheint und wie wenig quantitative Schlüsse

aus ihr zu ziehen sind, so gibt sie doch schon wichtige Fingerzeige für die Verminderung der passiven Widerstände. Sie erklärt, dass man durch blosse Zuspitzung des Vorderteiles eines Flugkörpers z. B. eines Lenkballons allein nicht den Widerstand beliebig herabsetzen kann, wie nach der Newtonschen Theorie anzunehmen wäre, sondern dass die Formgebung der Rückseite, wo die eigentliche Quelle des Widerstandes zu suchen ist, wichtiger ist. Die günstige Wirkung der Fischform wird durch sie durchaus verständlich. Auf Grund dieser Anschauung wird man auch nicht geneigt sein, die hindernde Wirkung der Takelung eines Luftschiffes, die sogar bei dem Zeppelinschen noch mindestens ein Drittel vom reinen Widerstand des glatten Ballonkörpers beträgt, zu unterschätzen.

Aber auch für die aktive Wirkung des Luftwiderstandes, die in der Hebewirkung der Tragflächen von Drachenfliegern ihren augenfälligsten Ausdruck findet, liefert die hydrodynamische Theorie bemerkenswerte Gesichtspunkte. Ich erwähnte schon, dass die Newtonsche Theorie sehr grosse Arbeitsaufwände für Hebewirkungen postuliert, die mit der Erfahrung nicht in Einklang stehen. Die hydrodynamische Theorie zeigt uns nun, dass so wie ein idealer Fall gleichförmiger Bewegung ohne schädlichen Luftwiderstand denkbar, ja theoretisch sogar die Regel ist, diese widerstandslose Bewegung auch noch mit einer Hebewirkung verknüpft sein kann, also ein dauerndes Schweben eines schweren Körpers in gleicher Höhe in der Luft ohne Arbeitsaufwand im Idealfalle wenigstens keinem inneren Widerspruch begegnet. Diese mit den Kirchhoff'schen Ergebnissen über die Bewegung eines Körpers in einer vollkommenen Flüssigkeit schwer zu vereinigende Behauptung ist erst in letzter Zeit mit Erfolg aufgestellt worden. Vor sieben Jahren hat M. Kutta, angeregt durch die Versuche Lilienthals, die Formeln für eine Strömung aufgestellt, welche eine rechteckige quer zur Langseite schwach zylindrisch gebogene, lange und schmale Platte hervorruft, wenn sie in horizontaler

Richtung parallel zur Sehne des gebogenen Querschnittes durch die Luft bewegt wird (Auftriebskräfte in strömenden Flüssigkeiten Ill. aéron. Mitteilungen 1902, S. 133). Es tritt dabei keinerlei Diskontinuität auf und dementsprechend ist auch kein dauernder Arbeitsaufwand für die Bewegung nötig. Aber dennoch erfährt die Platte einen Auftrieb senkrecht zur Sehne des Querschnittes und damit zur Richtung der Bewegung. Die Grösse dieses Auftriebes steht mit dem Experiment wohl in Einklang. Neuerdings hat Lanchester (Aerial Flight 1. Bd.) unabhängig davon eine Reihe ähnlicher, wenn schon weniger schlagender Beispiele aufgefunden und zugleich den schon von Kutta angedeuteten Grund aufgedeckt, warum für solche Fälle die Argumentation von Kirchhoff, wonach bei gleichförmiger kontinuierlicher Bewegung ein Widerstand nicht entsteht, versagt. Kirchhoff setzt nämlich stillschweigend voraus, dass der Raum, in dem sich die Luft befindet, durch den hindurch bewegten Körper nicht unterteilt wird, oder, mathematisch ausgedrückt, von einfachem Zusammenhange bleibt. Bewegt sich nun ein sehr langgestreckter Körper quer zu seiner Längsausdehnung durch die Luft, so unterteilt sich der Luftraum in dem Sinne, dass er praktisch zweifach zusammenhängend wird, kreisende Bewegungen der Luft um den Querschnitt des Körpers daher viel natürlicher verlaufen und ein Umfliessen des Längsschnittes als nahezu ausgeschlossen erscheint. Solche kreisende Bewegungen führen aber im Zusammenhang mit der fortschreitenden Bewegung stets zu einer Auftrieb Wirkung senkrecht zur fortschreitenden Bewegung. Auf der Oberseite der Platte vermehrt nämlich die kreisende Bewegung die fortschreitende, dort haben wir grosse Geschwindigkeiten und dementsprechend geringen Druck. Auf der Unterseite wirken beide Bewegungen gegeneinander und es entstehen kleine Geschwindigkeiten mit grossem Druck. Das Ergebnis ist ein Überdruck nach oben. Da er senkrecht zur Bewegungsrichtung ist, leistet er keine Arbeit und sein Auftreten bei der ohne Arbeitsaufwand

unterhaltenen Bewegung bedeutet daher auch keinen Widerspruch mit dem Gesetz von der Erhaltung der Energie. Der ganze Vorgang lässt noch eine andere, sehr anschauliche Auffassung zu. Die kreisende Luftbewegung um die Querschnitte des Körpers bildet einen Wirbel, dessen Drehachse sich in der Längsrichtung des Körpers erstreckt. Diese Wirbelachse setzt sich immateriell über die beiden Enden des Körpers hinaus und zwar bogenförmig nach rückwärts fort und müsste in einem reibungslosen Medium in zwei Punkten die Erdoberfläche erreichen. Wirbel in einem reibungslosen Medium sind nun unzerstörbare Gebilde. Einmal erzeugt, pflanzen sie sich in alle Ewigkeit fort, eine Eigenschaft, die bekanntlich Lord Kelyin veranlasste, die materiellen Atome als Wirbel des Äthers aufzufassen. Auf einem solchen einmal erzeugten Wirbel reitet nun gewissermassen die Platte horizontal weiter und wird dabei vom Wirbel getragen.

Selbstverständlich treten bei dieser Bewegung, wenn sie von einem wirklichen Flugorgan erzeugt wird, allerlei hindernde Widerstände auf, insbesondere sorgt die innere Reibung der Luft für ein allmähliches Erlöschen des Wirbels, der dann mit einem gewissen Arbeitsaufwand weiter unterhalten werden muss, allein dieser Arbeitsaufwand hat nicht, wie auf Grund der Newton'schen Theorie anzunehmen war, eine unüberschreitbare untere Grenze. Es bleibt stets die Hoffnung, ihn durch geschickte Anordnung weiter zu verringern.

Als praktische Regel für die Ausführung von Flugmaschinen ergibt sich aus dieser Anschauung die möglichste Vermeidung von Hindernissen auf der Oberseite der Tragflächen, im stärker bewegten Luftstrom, während solche auf der Unterseite weniger störend sind. Die hydrodynamische Theorie des Luftwiderstandes lässt sich zwangslos zu einer Theorie der Luftschrauben erweitern, wenn man die von Rankine geschaffene Grundlage der Theorie der Schiffsschraube benutzt. Man hat dabei den Vorteil, dass

die Voraussetzungen der Theorie bei den Luftschrauben wesentlich strenger erfüllt sind, als bei den Schiffsschrauben. Man setzt, durch die Erfahrung berechtigt, voraus, dass die Schraube hinter sich einen zylindrisch begrenzten Reaktionsstrahl erzeugt, dessen lebendige Kraft durch dauernden Arbeitsaufwand zu unterhalten ist, und dessen Stosswirkung in Richtung der Schraubenachse den Vortrieb liefert. Die durch Einwirkung eines Torsionsmomentes auf die Schraube übertragene Arbeit bewirkt eine Verdrehung des Reaktionsstrahles. Dem frei sich entwickelnden Vorstrom und dem verwundenen Reaktionsstrahl muss sich die Form der Schraubenflügel anpassen. Freilich sind wir auch hier von einer mathematisch strengen Lösung des zugehörigen Strömungsproblems noch weit entfernt und die Näherungen, die man bislang zu benützen genötigt war, liefern keine quantitativen Resultate, sondern nur die rohe Form der Abhängigkeit der massgebenden Grössen voneinander und erst Versuche können den entwickelten Formeln einen praktisch verwertbaren Inhalt geben.

Vor ähnliche Verhältnisse sind wir durch Annahme der Eulerschen Grundlage der Aerodynamik allenthalben gestellt. Während auf Grund des Newton'schen Ansatzes für jedes Problem der Weg zur rechnerischen Lösung vorgezeichnet war, sind wir nunmehr fast stets zur Entscheidung durch das Experiment gedrängt und die tiefere Einsicht, welche uns die neue Grundlage in das Wesen der aerodynamischen Vorgänge verschaffte, hat uns die Notwendigkeit neuer Versuche auf's klarste erwiesen. Die Unentbehrlichkeit des Experimentes gilt in noch höherem Masse dort, wo uns jegliche theoretische Grundlage fehlt, wie bei schwirrenden, flatternden oder ähnlichen unregelmässigen Vorgängen.

Versuchsergebnisse liegen nun freilich in grosser Zahl bereits vor, aber bei kritischer Sichtung bleibt wenig Unanfechtbares übrig. Zweifellos ist ein sehr grosser Teil der Versuche durch falsche Grundanschauungen, sei es in ihrer

Anordnung, sei es bei ihrer Auswertung entsteht. Insbesondere hat die Folgerung aus der Newtonschen Theorie, dass die Luftwiderstände der einzelnen Teile eines Körpers unabhängig von einander seien und sich infolgedessen mittels gewisser noch aufzufindender Elementargesetze aus den Luftstosswinkeln gegen die einzelnen Oberflächenelemente berechnen lassen, viele Forscher ins Irre geführt. Ich will versuchen, die Gesetze namhaft zu machen, welche nach unserem jetzigen Stande der Kenntnis als empirisch und theoretisch genügend gestützt gelten können und eine relativ sichere Basis für neue Versuche abgeben. Zunächst das Gesetz von der Proportionalität des Luftwiderstandes mit der Luftdichte, dem Quadrat der Relativgeschwindigkeit zwischen Körper und Luft in grösserer Entfernung bei paralleler Bewegung des Körpers gegen die Luft und die Proportionalität mit der dem Winde zugekehrten Querschnittsfläche bei ähnlich gestalteten Körpern.

Mit verhältnismässig geringen, sehr naheliegenden Verallgemeinerungen folgt daraus das Gesetz der Ähnlichkeit der Bewegungen von Körpern in Luft, welches mit Rücksicht auf die nirgend auszuschaltende Schwere und unter Vernachlässigung der Oberflächenreibung folgendermassen formuliert werden kann. Bei n -facher Vergrösserung der Lineardimensionen wächst das Gewicht n^3 mal, die Querschnitte n^2 mal. Damit der Luftwiderstand in gleichem Masse wie das Gewicht wachse, muss die Geschwindigkeit, deren Quadrat er ausser den mit n^2 zunehmenden Querschnitten proportional wird, mit $\sqrt{n}$ wachsen, was im Zusammenhang mit den n -fach vergrösserten Lineardimensionen einer $\sqrt{n}$ -fach vergrösserten Zeit gleichkommt. Die zur Überwindung des Luftwiderstandes aufzuwendende sekundliche Arbeit ist gleich dem Produkt aus Luftwiderstand und Geschwindigkeit und wächst daher mit $n^{7/2}$. In diesen Formulierungen, deren Bedeutung für den Schiffbau und Schiffantrieb Froude zuerst erkannte, steckt eine noch wenig ausgebeutete Quelle von fruchtbaren Experimentaluntersuchungen mittels Modellen.

Wir wollen nun die hauptsächlichsten empirischen Methoden und Versuchsanordnungen, sowie deren Fehlerquellen kurz besprechen. Für die Untersuchung der Teilwirkung des Luftstromes auf eine bestimmte Stelle der Oberfläche gibt es ein prinzipiell einfaches manometrisches Verfahren. Der betr. Körper wird an der zu untersuchenden Stelle mit einer feinen Öffnung versehen, an welche sich eine durch das Innere erstreckende Rohrleitung anschliesst, die auf der Rückseite aus dem Körper heraustritt und zu einem feinen Manometer führt. Wird der Körper angeblasen, so zeigt das Manometer die an der Öffnung herrschende Druckdifferenz gegenüber dem Atmosphärendruck der unbewegten Luft an. Um die Methode ausführen zu können, braucht man Luftgeschwindigkeiten von mindestens 10 Metern, wobei die Druckdifferenzen immer noch unter 5 mm Wassersäule bleiben. Die von Recknagel ausgiebig verwendete Methode hat den prinzipiellen Nachteil, dass sie die Luftreibung im engeren Sinn nicht berücksichtigt.

Einfacher ist die Ausführung der Bestimmung der Gesamtwirkung des Luftwiderstandes, die im wesentlichen darin besteht, dass der Körper in vorgegebener Stellung dem Luftstrom ausgesetzt wird, wobei die ihn haltenden Organe mit Vorrichtungen ausgestattet sind, die gestatten, die auf sie übertragenen Drücke oder Drehmomente zu messen. Aus ihnen lässt sich dann das von Luftwiderstand und Schwere gemeinsam erzeugte Kräftesystem (Resultante und resultierendes Moment) berechnen, woraus nach Abzug der Wirkung der Schwerkraft die des Luftwiderstandes übrig bleibt. Eine Fehlerquelle bildet natürlich dabei immer der Luftwiderstand der Halte- und Messvorrichtungen. Auf diesem Wege sind die Lilienthalschen Bestimmungen des Luftwiderstandes schwach gekrümmter Flächen und die Langley'schen Untersuchungen über den Widerstand ebener Platten entstanden,

Diese zweite Methode berücksichtigt ausser dem eigentlichen Luftwiderstand auch noch die Oberflächenreibung

und durch Kombination beider Methoden ist eine Trennung der beiden Teile des Luftwiderstandes möglich. Für die praktische Ausführung beider Methoden ist von entscheidender Wichtigkeit, ob dabei der Körper ruht und die Luft sich bewegt, oder umgekehrt. Beide Möglichkeiten stossen auf nicht geringe Fehlereinflüsse, die die Geduld des Beobachters auf das äusserste beanspruchen. Bei bewegtem Körper in ruhender Luft müssen mindestens die Messgeräte (so beim Rundlaufapparat), manchmal sogar der Beobachter, wenn etwa auf einem laufenden Wagen gemessen werden soll, mit bewegt werden. Dadurch entstehen schädliche Luftströmungen, die besonders bei Anwendung des Rundlaufapparates und grösseren Geschwindigkeiten leicht verhängnisvoll werden. Beobachtet man gar im Freien, so stört die stets vorhandene und kaum fühlbare Luftbewegung die Resultate erheblich.

Man ist daher neuerdings zu der Beobachtungsmethode bei feststehenden Körpern in bewegter Luft übergegangen. In einem Kanal von grossem Querschnitt wird mit einem Ventilator durch Saug- oder Druckwirkung ein kräftiger Luftstrom erzeugt, dem dann die zu untersuchenden Körper ausgesetzt werden. Leider ist ein solcher Luftstrom zunächst nichts weniger als homogen und von gleicher Geschwindigkeit. Die Luftbahnen sind vielmehr schraubenförmig angeordnet und ausserdem noch mit erheblicher Turbulenz behaftet. Durch ein kompliziertes System von Führungen gelingt es schliesslich den Luftstrom so zu richten, dass er auf eine genügende Versuchsstrecke annähernd parallel, gleichförmig und pulsationsfrei ist. Zu dieser Beruhigung ist ein verhältnismässig grosser Energieaufwand erforderlich, der etwa $\frac{1}{3}$ des zur Erzeugung des ursprünglichen Luftstromes nötigen beträgt. Die erste grössere Einrichtung dieser Art wurde 1906 auf Anregung von Joukowsky in Kutschino bei Moskau mit einer Röhre von 1,2 m Weite und Geschwindigkeiten bis 6,5 m getroffen und zwar nach dem Vorgange von Charles Renard, der in Meudon bei

Paris einen kleinen Versuchsapparat mit 0,3 m Durchmesser ausprobiert hatte. In noch grösserem Masstab mit einem Kanal von 2 m im Quadrat ist gegenwärtig das aerodynamische Institut in Göttingen von Professor Prandtl ausgestattet, wobei ein 40pferdiger Ventilator verwendet wird, mit dem man 10 m Geschwindigkeit erzeugen kann. Prandtl hat die Vorrichtungen zur Beruhigung des Luftstromes am feinsten ausgebildet, die Abweichungen der Einzelgeschwindigkeiten vom Mittel bleiben unter 2 %. (Zeitschr. d. Ver. deutscher Ing. Bd. 53, S. 1711, 1909.)

Die beiden bisher betrachteten Methoden sind statische, insofern bei ihnen der Luftwiderstand im Beharrungszustande der Bewegung gemessen wird. Es gibt aber auch eine dynamische Methode, die darauf beruht, dass man die Bewegungen studiert, die Körper unter dem Einfluss des Luftwiderstandes ausführen und aus diesen Bewegungen auf die Grösse und Richtung des Luftwiderstandes schliesst. Es handelt sich dabei in erster Linie um Gleitflugversuche in ruhender Luft mittels Modellen, dann um Versuche mit Modellen, die Motoren tragen (zumeist tordierte Gummischnüre). Aber auch Gleitversuche mit bemannten Apparaten, wie sie zuerst von Lilienthal in erfolgreichster Weise durchgeführt wurden, und schliesslich die Flüge mit wirklichen Flugmaschinen können zur Ermittlung des Luftwiderstandes nach dieser dynamischen Methode dienen. Es leuchtet ein, dass Versuche dieser Art am schwersten zu deuten sind und gewissermassen nur als „Experimenta crucis“ gelten können, um die aus den statischen Methoden gewonnenen Ergebnisse im Grossen zu erhärten. Als erfolgreichster Experimentator mit kleinen Gleitflugmodellen hat sich Lanchester bewährt, welcher eine Reihe von schwierigen Versuchen mit kleinen Glimmermodellen dazu benutzt hat, Oberflächenreibung und Luftwiderstand an Aeroplanen getrennt zu bestimmen. Unter den Experimentatoren im Grossen nach der dynamischen Methode stehen zweifellos die Gebrüder Orville und Wilbur Wright obenan. Das

Wenige, was sie über ihre Gleitflugversuche und sonstigen Experimente vor ihren epochemachenden Motorflügen im Jahre 1903 veröffentlicht haben, zeigt, dass sie in durchaus systematischer Weise vorgegangen sind und die beiden sich leicht störenden Forderungen wissenschaftlicher Erkenntnis und technischer Verwertbarkeit in geradezu genialer Weise zu vereinigen wussten. Nichts wäre falscher, als den Erfolg dieser Männer in erster Linie kühnem Draufgängertum und akrobatischer Geschicklichkeit zuzuschreiben; die wissenschaftliche und technische Leistung, die ihre Arbeit gezeitigt hat, sollte sie vor der zweifelhaften Ehre bewahren, mit den Kämpfen der Radrennbahn auf gleiche Stufe gestellt zu werden.

Zu den Problemen, welche die Praxis der Luftschiffahrt in den Vordergrund gerückt hat, und die bei dem früheren theoretischen Betrieb der Aerodynamik kaum als Kuriosa gestreift wurden, ist das der Stabilität des Fluges in erster Linie zu zählen. Bei den Lenkballons trat es zuerst auf, als die starken Motoren grössere Geschwindigkeiten ermöglichten. Der nächste Erfolg war eine gesteigerte Instabilität, welche die Lenkbarkeit gänzlich in Frage stellte. Sie wurde praktisch nach dem Vorschlage von Charles Renard dadurch erzielt, dass man den fischförmigen Körper mit passenden Hinterflossen, einer sogenannten Befiederung versah, welche dem Bestreben des ungefederten Ballonkörpers sich bei einer kleinen Störung seiner parallelen Lage zur Windrichtung schief, ja schliesslich quer zu ihr zu stellen, entgegentritt, und, wenn sie im richtigen Ausmass gewählt ist, umsomehr entgegentritt, je schneller der Ballon bewegt ist. Ch. Renard hat durch Modellversuche die ablenkenden Kräfte des Luftwiderstandes bei verschiedenen Stellungen des Ballonkörpers studiert und darauf die Theorie der Befiederung begründet, welche erst im Kleinen und später bei allen schneller bewegten Luftballons im Grossen betätigt wurde.

Bei den Flugmaschinen liegt die Frage der Stabilität etwas anders. Schon 1871 hatte Pénaud an freifliegenden

Modellen gezeigt, dass sich durch Anfügung eines ebenen Schwanzes, der gegen die Haupttragflächen unter schwachem Winkel geneigt ist, vollkommene Stabilität erzielen lässt, und seither haben die Erfahrungen an Kastendrachen, die sich von der Schnur loslösten, die Möglichkeit eines automatisch stabilen Fluges ergeben, ja es zeigte sich, dass schon eine ebene Platte mit exzentrischem Schwerpunkt eines solchen Fluges fähig ist. Vor wenigen Jahren hat die von Routh ausgebildete Theorie der Stabilität von Bewegungen einen mathematischen Ansatz ermöglicht, der unter der Voraussetzung der Kenntnis empirischer Daten die Frage nach dem Vorhandensein und dem Grade der Stabilität innerhalb eines sehr kleinen Störungsbereiches mathematisch zu entscheiden und sogar die Schwingungen, die ein Flugkörper unter dem Einfluss kleiner Störungen um die ungestörte Bahn ausführt, zu berechnen gestattet. Ich muss dabei nachtragen, dass schon Joukovsky vor langem (1891), die Bahnen eines annähernd ebenen Flugkörpers unter der Voraussetzung, dass sie unter dem Einfluss der Schwere und eines dem Quadrat der Geschwindigkeit proportionalen hebenden Widerstandes in einer Vertikalebene vor sich gehen, berechnen gelehrt hat. Die erwähnten Schwingungen setzen sich aus zwei gedämpften Grundschrwingungen zusammen, von denen eine die andere stark überwiegt, so dass sie zumeist allein zur Geltung kommt. Eine bislang fehlende Vorbedingung für die Anwendung dieser aussichtsreichen Theorie ist die Kenntnis des Luftwiderstandes der Flugmaschine, nicht nur in der Normalstellung zum Wind, sondern auch der Änderung desselben bei den kleinen Abweichungen der Normalstellung, wie sie momentane Störungen der Lage mit sich bringen. Insbesondere mangeln bisher noch alle Angaben über den Luftwiderstand, wenn der Luftstrom aus der Symmetrieebene des Flugkörpers heraustritt, wie das bei räumlich gekrümmten Bahnen stets der Fall ist. Für die Beurteilung der steuernden Wirkung windschief verdrehter Flächen fehlen uns heutzutage noch

alle Grundlagen. Hier ist ein weites Feld für die Arbeit aerodynamischer Institute gegeben.

Ein weiteres Problem von grosser Dringlichkeit im Zusammenhang mit dem Stabilitätsproblem bieten die Luftschrauben. Wir wollen einmal von der allerdings noch sehr wünschenswerten Verbesserung der Wirkung derselben unter normalen Umständen, also wenn sie parallel ihrer Drehachse angeblasen werden, absehen, da wir für diesen Fall eine leidliche Theorie bereits besitzen. Was uns aber noch ganz unbekannt ist und für die Stabilität der heutigen Drachenflieger von Einfluss ist, für die Flugfähigkeit und Lenkung der zukünftigen Schraubenflieger aber geradezu den Ausschlag gibt, das ist das Verhalten von Luftschrauben in beliebig gerichtetem Winde. Schon haben sich bemannte Schraubenflieger längere Zeit in der Luft gehalten und dabei erhebliche Strecken zurückgelegt. Es ist daher an der Zeit, dass die Aerodynamik auch für diese Möglichkeit des Fluges die Grundlagen liefert, was mit den schon im Gebrauch befindlichen Einrichtungen der aerodynamischen Institute geschehen kann.

Allzuleicht liesse sich das Programm dringend nötiger Untersuchungen auf unserm Gebiete vermehren, und sicher werden längst neue Wünsche auftauchen, ehe die schon bestehenden erfüllt sind. Die Errichtung neuer Institute für aerodynamische Forschung ist allenthalben erforderlich. Die einzigen Arbeitsgelegenheiten dieser Art in Deutschland, die Modellversuchsstation in Göttingen und die Schraubenversuchsstation in Lindenberg, sind durch Zuwendungen aus industriellen Kreisen entstanden. Auf die Dauer werden sich aber auch die Staaten den Forderungen der Zeit nicht mehr entziehen können, und da an der Luftschiffahrt im Gegensatz zur Seeschiffahrt alle Staaten gleichmässig beteiligt sind, oder doch in Zukunft sein werden, ist zu hoffen, dass im edlen Wettstreit der Nationen der Wissenschaft und Technik zahlreiche und fruchtbringende Werkstätten erschlossen werden. Unsere Zeit hat den Traum von Jahr-

tausenden in Erfüllung gehen sehen, und ihr ist es vergönnt gewesen, die Luft zu erobern. Dennoch dürfen wir kaum erwarten, dass die Aerodynamik am Aufschwung der Luftschiffahrt in gleichem Masse teilnimmt, oder etwa gar die Führung an sich reisst. Diese wird noch auf lange hinaus dem Wagemut der Konstrukteure und Piloten verbleiben. Gleich der Hydrodynamik oder mehr noch ihrer nützlichen Magd, der Hydraulik, steht auch der Aerodynamik ein harter Kampf mit Beobachtungsschwierigkeiten einerseits und einer kaum übersehbaren Mannigfaltigkeit der Erscheinungen andererseits bevor, bei deren Sichtung von der mathematischen Theorie nicht allzuviel zu erwarten ist. Hoffen wir, dass sich neben den unbedingt nötigen äusseren Mitteln ausdauernde und kritische Beobachter finden werden, die den Kampf mit Erfolg aufnehmen. Sein Ergebnis wird die gesicherte Grundlage für neue Errungenschaften der Luftschiffahrt sein, sein Preis die Bereicherung unserer Kultur.
