(Aus dem physiologischen Institut der Universität Strassburg i. E.)

Notizen zum Problem des Vogelfluges.

Von

Martin Gildemeister.

(Mit 3 Textfiguren.)

Einige Beobachtungen über den Schwebeflug.

Vor einigen Jahren hatte ich Gelegenheit, bei einer Reise nach der Westküste von Amerika an Möwen und Albatrossen Beobachtungen über den Flug anzustellen. Dabei habe ich mancherlei zu Gesicht bekommen, was eine kurze Mitteilung wohl rechtfertigen dürfte.

Wenn man den 30. Grad südlicher Breite passiert hat, begegnet man in der Bucht des Rio de la Plata einem auffallend reichen Tierleben. Was den Neuling in erster Linie fesselt, sind die riesigen Sturmvögel und Albatrosse (*Procellaria* und *Diomedea*), die das Schiff bis hinunter zur Magellanstrasse nicht mehr verlassen. Noch schönere und grössere Exemplare dieser Familien, die nach meiner Meinung auch noch eleganter zu fliegen verstehen, sieht man an der westlichen Küste vom 48. bis zum 42. Breitengrade, vom Golf von Peñas bis zur Insel Chiloe. (Von der Magellanstrasse bis zum Golf von Peñas verfolgen die Dampfer einen engen, durch die vorgelagerten Inseln vor Wind geschützten Kanal, der an guten Fliegern arm ist.)

Ich habe diese riesigen Vögel¹⁾ oft lange beobachtet und kann versichern, dass ich bei manchen Exemplaren, trotzdem ich sie viertelstundenlang nicht aus den Augen liess, nicht einen einzigen Flügelschlag gesehen habe. Sie schwebten in weiteren oder engeren Kreisen um das mit etwa 18 km Stundengeschwindigkeit schräg gegen lebhaften Wind fahrende Schiff (windstilles Wetter habe ich

1) Ein Albatross, der in meiner Gegenwart geschossen wurde, maass von einer Flügelspitze zur andern $3\frac{3}{4}$ m.

in diesen Gegenden nicht erlebt), oder verharrten fast unbeweglich einige Meter über dem auf dem Hinterteile des Schiffes befindlichen Aufbau, auf dem der Kadaver eines Seehundes lag. Der Wind mag etwa eine Geschwindigkeit von 5 m/sek. gehabt haben, und ebenso schnell fuhr das Schiff; die Vögel überwandten also ohne Flügelschlag einen Gegenwind von 10 m/sek.

Beim Kreisen ist mir aufgefallen, dass in der Nähe des Schiffes von den Vögeln immer derselbe Drehungssinn festgehalten wurde, der auf Fig. 1 angedeutet ist. Der Wind kam meistens von links vorne; dann flogen die Vögel im Drehungssinn des Uhrzeigers, d. h. an der linken Schiffswand dem Winde entgegen, gewannen vorne die rechte Seite und kehrten auf dieser nach hinten zurück. Das ist sehr wesentlich für die Erklärung des Schwebens. Leider besass ich damals nicht das nötige Verständnis für die Sache, um auf ihre gleichzeitige Höhenveränderung zu achten.

Fig. 1. Das Kreisen des Vogels um das Schiff.

Wenn von Jouan (Brehm's Tierleben, II. Auflage, Vögel Bd. 3 S. 563) angegeben worden ist, die Albatrosse machten bei windigem Wetter alle 7 Minuten einen Flügelschlag, so kann ich das für eine ungenaue Beobachtung erklären. Das Tier schlägt ausser beim Erheben von der Wasserfläche nur dann mit den Flügeln, wenn es zufällig in besonders ungünstige Umstände, z. B. in den Windschatten eines grossen Gegenstandes, geraten ist. Das hängt aber von Zufälligkeiten ab. Befanden sich die Vögel in einiger Entfernung vom Schiffe, so habe ich bei ihnen nie Flügelschläge gesehen.

Wenn die Tiere nur einige Meter entfernt anscheinend mühelos an mir vorbeischwebten, habe ich aufmerksam nach irgendwelchen Bewegungen geforscht. Nichts war an ihnen zu sehen als geringe und langsame Bewegungen des Kopfes und des Schwanzes, den fast unmerklichen Balancierbewegungen vergleichbar, die man beim Radfahren mit der Lenkstange machen muss. Wenn die Flügelspitze auch nur um 5 cm vibriert hätte, so hätte ich es bemerken müssen.

Noch besser als die Albatrosse habe ich im Nordwesten von Amerika, auf der Fahrt von San Francisco nach Vancouver, eine grosse Möwe beim Schwebefluge beobachten können. Ein solcher Vogel von stattlicher Grösse (Flügelspannweite etwa 1,50 m) schwebte etwa 10 Minuten lang über dem vorderen Teile der Kommandobrücke, während ich dicht unter ihm stand. Die Entfernung zwischen ihm und meinem Auge betrug etwa 2 m. Der Wind kam gerade von vorne. Die Geschwindigkeit des letzteren und die des Schiffes betrugen auch etwa je 5 m pro Sekunde.

Während der ganzen Zeit habe ich das Tier genau beobachtet; auch hier waren an ihm ausser dem schon erwähnten Balancieren durchaus keine Bewegungen zu bemerken. Jede einzelne Feder stand absolut still. Damals fand ich keine Erklärung für die mir ganz rätselhafte Erscheinung. Jetzt, nachdem ich die Literatur über den Schwebeflug kennen gelernt habe, denke ich anders darüber. Es handelt sich zweifellos um die geschickte Ausnutzung aufsteigender Luftströme, die nach dem Bau des Schiffes gerade dort, wo der Vogel schwebte, notwendig vorhanden sein mussten.

Wenn nämlich der Wind auf eine Erhöhung trifft, so steigt die Luft an der Vorderseite derselben teilweise aufwärts, um an der Rückseite wieder hinabzufallen. Nun stellt das ganze Schiff eine Erhöhung über der Meeresfläche dar; an den dem Winde zugekehrten Teilen desselben entstehen also Luftströmungen, die schräg aufwärts gerichtet sind und gegen passend orientierte Flächen einen Druck auszuüben vermögen, der nach aufwärts und vorwärts (gegen den Wind) gerichtet ist (s. Fig. 2). So kann also eine horizontale Bewegung gegen den Wind zustande kommen. Auf diese Weise wird es verständlich, warum sich der Vogel beim Kreisen, wenn er gegen den Wind vorwärts kommen will, auf der Windseite des Schiffes hält (s. vor. Seite Mitte).

Betrachtet man das Profil eines Dampfers, das auf Fig. 3 schematisch dargestellt ist, so leuchtet ein, dass die zum Schweben

Fig. 2. Durch das Auftreffen des aufsteigenden Windes auf den schräg gehaltenen Flügel entsteht die Druckkraft D (senkrecht zum Flügel), die sich in die beiden Komponenten a und b zerlegen lässt. a wirkt der Schwere entgegen, b treibt gegen den Wind vorwärts.

nötige Ablenkung des Luftstromes von der Horizontalen ausser an der Bordwand noch an zwei anderen Stellen auftreten muss, nämlich bei *A* und bei *B*. *A* bezeichnet den mittleren Aufbau, dessen oberstes Stockwerk die Kommandobrücke ist, und *B* den hinteren Aufbau. Wo das Kreuz $\times$ über *A* angebracht ist, befand sich aber die schwebende Möwe, von der ich eben berichtet habe. So findet das Rätsel eine höchst einfache Lösung. Auf dieselbe Weise ist das Schweben der Albatrosse über dem Kadaver des Seehundes (s. S. 386 oben) bei $\times\times$ zu erklären; denn auch dort wurde die Luft an dem hinteren Aufbau des Schiffes, wie aus Fig. 3 zu ersehen ist, nach oben abgelenkt.

Der Schwebeflug in der Nähe des Schiffes ist also mit Hilfe der aufsteigenden Luftströme zwanglos zu erklären; anders ist es aber mit dem Kreisen der Albatrosse über der freien Meeresfläche. Wenn

Fig. 3. Ablenkung des Windes nach oben am Bug, bei *A* und bei *B*.

dort die Luft an einzelnen Stellen, wie z. B. vor einer grossen Welle, auch nach oben abgelenkt werden mag, so wird sie doch ebenso oft die umgekehrte Richtung einschlagen. Bekanntlich sind aber aufsteigende Luftströme nicht die einzigen physikalischen Bedingungen, die den Schwebeflug wenigstens theoretisch verständlich machen. Wir wollen untersuchen, was davon über der freien Meeresfläche realisiert sein kann.

Es ist schon oft darauf hingewiesen worden, dass zwei aneinander-grenzende Luftströme von verschiedener Geschwindigkeit einen Vogel befähigen, einen Teil der Windenergie zur Überwindung der Schwerkraft nutzbar zu machen. Das dazu nötige Verfahren ist z. B. von Rayleigh¹⁾ und v. Parseval²⁾ dargelegt worden; die Tiere müssen dann kreisen. Spricht nun etwas dafür, dass der Wind dicht über dem Meere eine andere Geschwindigkeit hat als in grösseren Höhen?

1) Lord Rayleigh, Nature vol. 27 p. 534.

2) A. von Parseval, Die Mechanik des Vogelfluges S. 122. Bergmann, Wiesbaden 1889.

Nach meiner Meinung kann darüber gar kein Zweifel herrschen. Denn die Existenz der Wellen beweist, dass die untersten Luftschichten dauernd Energie abgeben und deshalb Geschwindigkeit verlieren. Es muss sich schliesslich ein stationärer Zustand ausbilden, bei dem sie ebensoviel an das Wasser abgeben, wie sie von den schnelleren über sie hinwegstreichenden Luftteilchen aufnehmen. So sind die physikalischen Bedingungen für das Kreisen gegeben.

Manchmal habe ich aber die grossen Vögel auch eine beträchtliche Strecke in fast gerader Linie über das Wasser dahinschweben sehen. Für diese Fälle wird ein anderes Prinzip zur Erklärung herbeizuziehen sein.

Bekanntlich wechselt die Windgeschwindigkeit nicht nur lokal, sondern auch zeitlich¹⁾. Wenn der Wind aus einzelnen Stössen besteht, so kann der Vogel leicht daraus Energie schöpfen. Um den Mechanismus zu erläutern, hat Marey nach einer Idee von Bazin eine sinnreiche Vorrichtung angegeben²⁾. Man denke sich ein Brett in Wellenlinien gebogen. Legt man jetzt eine Kugel auf einen „Berg“, so wird sie in ein Tal hinab- und auf der andern Seite wieder hinaufrollen, aber wegen Reibung und Luftwiderstand nicht ganz ihre Ausgangshöhe erreichen. Schiebt man ihr jetzt das Brett mit einem Ruck entgegen, während sie gerade stillsteht und sich zum Umkehren anschickt, so wird sie wegen ihrer Trägheit nicht umkehren, sondern den zweiten Gipfel erreichen. Auf ähnliche Weise kann man sie auf den dritten, vierten usw. Gipfel treiben, die sogar höher sein können als der Ausgangspunkt. Hier gewinnt die Kugel aus den intermittierenden Bewegungen des Brettes Energie. Die Nutzenanwendung auf den Flug liegt auf der Hand.

Dass in der Luft etwas Ähnliches möglich ist, haben die Brüder Wright durch den Versuch bewiesen. Ich entnehme darüber einem Buch von F. Ferber³⁾ folgende Angabe, an der ich zu zweifeln keinen Grund habe (leider gibt der Autor seine Quelle nicht an): „Im Jahre 1903 glückte es ihnen (den Brüdern Wright) endlich, sich auf einem Fleck schwebend zu erhalten, ohne im geringsten zu

1) Siehe z. B.: S. P. Langley, The internal work of the wind. Americ. Journ. of science (3) vol. 47 p. 41.

2) E.-J. Marey, Le vol des oiseaux p. 317. Masson, Paris 1890.

3) F. Ferber, Die Kunst zu fliegen. Übersetzt von A. Schöning. R. C. Schmidt & Co., Berlin 1910.

sinken, d. h. ein richtiger Schwebeflug gelang. Sie warteten einen heftigen Wind von 10—12 m in der Sekunde ab, dem es ein leichtes war, sie in die Höhe zu heben. Sobald sie merkten, dass die Hubkraft nachliess, schwebten sie vorwärts, um Geschwindigkeit zu gewinnen. Beim ersten Windstoss liessen sie sich wieder höher heben, wobei sie zurückgetrieben wurden, und schlossen einen Gleitflug nach vorn an, sobald der Windstoss vorbei war, und so fort. So gelang es ihnen, sich 72 Sekunden in der Luft zu halten, ohne mehr als im ganzen 30 m von der Stelle zu kommen. Anmerkung dazu: Ein Brief Chanute's gibt als Datum den 22. November 1903.“

Da der Wind ja schneller läuft als die Wellen, müssen die untersten Luftmassen von Zeit zu Zeit einen Wellenberg einholen und an ihm eine Verzögerung erleiden. Auf diese Weise muss der Wind dicht über dem Meere zeitlich diskontinuierlich werden, so dass auch die Bedingungen für diese Art des Energiegewinnes gegeben sind.

Vielleicht findet von diesem Gesichtspunkt aus auch die auffallend schmale Flügelform der Meeresvögel ihre ungezwungene Erklärung. Nehmen wir an, das Tier bewege sich in der Richtung des Windes. Dann begegnen ihm abwechselnd schnell und langsam strömende Luftpartien. Je schmaler der Flügel, desto plötzlicher der Übergang von einer in die andere, desto kürzer das Verweilen auf der Übergangszone, aus der keine Energie entnommen werden kann. Also ist der schmale Flügel in diesem Falle zweckmässig.

Die Vögel, von denen ich bis jetzt gesprochen habe, schwebten alle bei lebhaftem Wind. In den subtropischen und tropischen Regionen von Süd- und Mittelamerika habe ich dieses Flugmanöver aber auch oft bei anscheinend fast fehlender Luftbewegung ausführen sehen. Ob in den Höhen des Vogels nicht doch lokale oder zeitliche Diskontinuitäten der Luftströmung existierten, muss unentschieden bleiben. Für einzelne Fälle glaube ich dies bestimmt behaupten zu können.

So habe ich einige Male grosse Vogelschwärme gesehen, die ihre Kreismanöver absolut gleichzeitig ausführten. Gleichzeitig stiegen sie, senkten sie sich, machten sie die Wendungen. Das kann zwei Gründe haben: 1. Es unterliegen alle Tiere gleichzeitig denselben äusseren, sich verändernden Einflüssen, auf welche sie alle in gleicher Weise reagieren. Dabei kann es sich wohl nur um Luftbewegungen handeln. 2. Es werden die Bewegungen eines Tieres von den anderen nachgeahmt.

Der zweite Erklärungsversuch ist nach meiner Meinung abzulehnen. Denn wenn die Vögel sich nach einem Führer richteten, so müsste doch zwischen der Bewegung desselben und ihrer eignen eine auch dem Beobachter bemerkbare Zeit vergehen, und das ist nicht der Fall. Man könnte noch annehmen, dass die Reaktionszeit bei Vögeln ausnehmend kurz sei. Aber auch diese Annahme kann ich durch folgende Beobachtung widerlegen:

An den Küsten von Mittel- und Südamerika hausen unzählige Pelikane. Diese haben die Gewohnheit, zu langen Ketten vereinigt dicht über das Wasser hinzustreichen. Dabei pflegen sie nach der Art unseres Hausstorches in kurzen Intervallen zwischen Ruder- und Gleitflug abzuwechseln. Das Signal zum Wechsel der Flugart geht immer vom Führer der Reihe aus, und es ist höchst interessant zu sehen, wie sich der neue Bewegungsmodus einer Welle gleich von vorn nach hinten über die ganze Kette fortpflanzt, und zwar nur mit mässiger Geschwindigkeit. Ich halte das für einen Beweis, dass die Reaktionszeit des Vogels durchaus nicht abnorm kurz ist.

Deshalb wird man annehmen müssen, dass das auf voriger Seite geschilderte Flugmanöver durch unregelmässige Luftströmungen veranlasst worden ist. Zu ebener Erde herrschte fast Windstille.

Wenn ich meine Beobachtungen zusammenfasse, so darf ich behaupten, dass ich keinen Fall von Schwebeflug gesehen habe, der nicht aus gewissen Eigenschaften des Windes physikalisch erklärbar gewesen wäre. Deshalb kann ich mich der neuerdings von Exner vertretenen „Zittertheorie“ nicht anschliessen, zumal da gegen diese, wie ich ¹⁾ nachgewiesen habe, schwerwiegende muskelphysiologische Bedenken vorliegen.

Zur Geschichte der Schwebeflugtheorien.

Um den Schwebeflug zu erklären, sind bekanntlich verschiedene Theorien aufgestellt worden, die man in physikalische und physiologische einteilen kann. Die ersteren nehmen an, dass der Wind die nötige Energie zur Überwindung der Schwere und des Luftwiderstandes hergebe; die letzteren, dass der Vogel mit seinen Muskeln arbeite.

1) M. Gildemeister, Pflüger's Arch. Bd. 135 S. 366.

Von den physikalischen Theorien haben sich nur diejenigen, welche die Abweichungen des Windes vom idealen, gleichmässig horizontalen Dahinfließen in Betracht ziehen, als haltbar erwiesen. Davon ist im vorigen Abschnitt genügend die Rede gewesen, so dass ich darauf nicht wieder einzugehen brauche.

Von den physiologischen Theorien ist die bekannteste die in neuester Zeit von Exner vertretene Zittertheorie, welche sehr frequente und deshalb nicht ohne weiteres wahrnehmbare Flügelschläge beim Schwebefluge annimmt. Auf die Bedenken, welche dieser Theorie vom muskelphysiologischen Standpunkte aus entgegenstehen, habe ich in einer früheren Arbeit hingewiesen. Hier will ich nur kurz darauf aufmerksam machen, dass schon Ch. Darwin vor 66 Jahren an diese Erklärungsmöglichkeit gedacht hat. In seinem Buche über die Weltumseglung an Bord des „Beagle“¹⁾ beschreibt er das Schweben des Kondors und fährt dann p. 186 fort: „As they (the condors) glided close over my head, I intently watched from an oblique position, the outlines of the separate and great terminal feathers of each wing; and if there had been the least vibratory movement, these separate feathers would have appeared as if blended together; but they were seen distinct against the blue sky.“ (27. April 1834.) Aus den von mir gesperrten Worten muss man nach meiner Meinung entnehmen, dass Darwin vorher an frequente Flügelschläge gedacht hatte. Man könnte aus dem Wortlaut vielleicht auch schliessen, dass diese Vermutung schon vorher von anderer Seite geäussert worden war.

In der ausländischen Literatur habe ich noch mehrere Stellen gefunden, wo von Schwirrbewegungen die Rede ist. So schreibt Mouillard²⁾: „on essayera de faire intervenir des battements inperceptibles“, und S. P. Langley³⁾ sagt: „It is frequently suggested by those who know these facts only from books, that there must be some quivering of the wings, so rapid as to escape observation.“ Bei deutschen Autoren habe ich nur die von Exner zitierte Stelle in dem v. Parseval'schen Buche finden können.

So hat Darwin anscheinend als Erster nach den Gründen des Schwebeflugs geforscht. Da er die Vibrationstheorie nicht anerkennen

1) Ch. Darwin, Journ. of researches etc. Murray, London 1845.

2) L. P. Mouillard, L'empire de l'air p. 237. Masson, Paris 1881.

3) S. P. Langley, The internal work of the wind. Americ. journ. of science (3) vol. 47 p. 42. 1894.

kann, meint er (Fortsetzung der eben zitierten Stelle), ob nicht vielleicht die Bewegungen des Halses und Körpers das Schweben ermöglichen. Das wäre die zweite physiologische Theorie, die aber wohl heutzutage keine Anhänger finden wird.

Die Flügelbewegung beim Ruderfluge.

Über die Bewegung der Flügel beim Fluge finden sich in den physiologischen Hand- und Lehrbüchern trotz der Arbeiten von Marey u. a. teilweise ganz irrtümliche Angaben. Deshalb will ich kurz die wichtigsten von den gesicherten Tatsachen zusammenstellen.

1. Der Niederschlag erfolgt nicht, wie man nach Analogie der Flimmerbewegung glauben sollte, schneller als der Aufschlag, sondern umgekehrt (Prechtl, Marey, Lilienthal, von Parseval u. a.). Ersterer dauert bei manchen Vögeln doppelt so lange als letzterer.

2. Der Flügel geht beim vollen Fluge niemals mit der Oberseite gegen die Luft; nur in den ersten Momenten kurz nach dem Auffliegen kann das stattfinden (Marey). Man hat zu berücksichtigen, dass der Vogel ja immer in der Bewegung gegen einen starken Luftstrom begriffen ist, so dass eine geringe Drehung des Flügels genügt, damit dieser auch bei der Hebung von der Luft auf der Unterfläche getroffen wird.

3. Die Flügelspitze bewegt sich beim Niederschlag relativ zum Vogel von oben hinten nach unten vorne, nicht von oben vorne nach unten hinten (siehe die Momentphotographien). Das ist selbstverständlich, wenn man die Neigung der Flügelfläche zum Horizont und den resultierenden Luftwiderstand auf den biegsamen Flügel berücksichtigt.

4. Beim Niederschlag erfährt der Vogel eine Hebung und Beschleunigung, beim Aufschlag eine *Hebung* und Verzögerung (wegen der unter 2. erwähnten Drehung).

Alle diese Tatsachen sind von Marey, dessen schönes Buch über den Vogelflug¹⁾ viel zu wenig bekannt ist, experimentell erhärtet worden.

Über die Arbeitsleistung beim Fluge.

In der Literatur über den Vogelflug spielt die Frage nach der dazu nötigen Arbeitsleistung eine grosse Rolle. Man hoffte, daraus

1) E.-J. Marey, *Le vol des oiseaux*. Masson, Paris 1890.

durch einen Analogieschluss diejenige Kraft ermitteln zu können, die einen Menschen durch die Luft zu tragen imstande wäre. Heutzutage, wo das Problem der Fortbewegung durch die Luft in seinen Grundzügen gelöst ist — freilich anders, als man es früher erträumt hatte —, hat dieses Problem sein technisches Interesse verloren; den Physiologen interessiert aber immer noch die Frage, ob der Vogel sich in seiner muskulären Leistungsfähigkeit von anderen Tieren unterscheidet.

Man kann die Flugarbeit sowohl berechnen als auch experimentell feststellen. So viel ich sehe, sind dazu bisher fünf verschiedene Methoden angewendet worden, denen ich noch zwei neue (Nr. 5 und 6) beifügen kann. Diese sieben Methoden will ich hier kurz zusammenstellen. Auf die umfangreiche Literatur über den Gegenstand kann ich in dieser kurzen Notiz nicht eingehen.

1. Das Raketenprinzip. Wenn ein Körper, der schwerer als die Luft ist, sich in derselben Höhe über der Erde halten will, so muss er dauernd so viel Luft gegen die Erde hin bewegen, dass die Kraft des Rückstosses gleich der Anziehungskraft der Erde, d. h. seinem Gewicht, ist. Dann wirken auf diesen Körper keine vertikalen Kräfte mehr. Die Kraft des Rückstosses eines fortgeschleuderten Körpers (also hier der Luft) ist gleich dem Produkte seiner Masse und seiner Beschleunigung. Wenn wie hier die Masse der Luft zuerst ruhend gedacht ist, kann die Beschleunigung numerisch gleich der Geschwindigkeit gesetzt werden. Bezeichnet G das Gewicht des schwebenden Körpers, so ist also $G = m v$ (m = Masse der in 1 Sek. senkrecht abwärts verschobenen Luft, v ihre Geschwindigkeit). Die in der bewegten Luftmasse steckende Energie, die ein Maass der zu ihrer Fortbewegung nötigen Arbeit ist, beträgt $\frac{m v^2}{2}$ oder $\frac{G v}{2}$. In Worten: die Arbeit,

die ein Vogel beim Fluge leisten muss, um die Anziehungskraft der Erde zu überwinden, ist (numerisch) gleich dem halben Produkt seines Gewichtes und der Geschwindigkeit der abwärts geschleuderten Luft. Letztere hängt hauptsächlich von der Grösse der Flügelflächen ab. Je kleiner diese, desto kleiner ist der Querschnitt der verschobenen Luftsäule, desto schneller muss also die Luft bewegt werden, damit in der Zeiteinheit ein gewisses Quantum gefördert wird.

Nun kann man in erster Annäherung annehmen, dass dauernd eine Luftsäule, deren Querschnitt den Flügelflächen gleich ist, in

Bewegung gesetzt wird. Daraus ergibt sich z. B. für eine Taube von 0,350 kg Gewicht eine Arbeit zur Überwindung der Schwere von 1,2 kgm pro Sek.; das macht pro kg 3,4 kgm/sec¹).

Dieser Wert macht auf Zuverlässigkeit gar keinen Anspruch. Denn die Luft wird durch die Bewegung komprimiert, wodurch noch eine in der „Raketengleichung“ nicht berücksichtigte Kraft entgegen der Schwerkraft entsteht. Ferner entsteht über dem Vogel ein luftverdünnter Raum, der in demselben Sinne wirkt. Schliesslich setzt der Flügel wahrscheinlich eine dickere Luftsäule in Bewegung, als oben angenommen ist, da auch die angrenzenden Luftteilchen beeinflusst werden. Alle diese Einflüsse müssen die tatsächliche Flugarbeit verkleinern, während andererseits zu berücksichtigen ist, dass nicht alle Luftteilchen senkrecht nach unten verschoben werden. Wahrscheinlich ist der obige Wert von 3,4 kgm pro kg nur als oberer Grenzwert zu betrachten.

Zu dieser Schwebearbeit kommt noch die Arbeit, die zur Überwindung des Luftwiderstandes bei der Fortbewegung nötig ist. Da diese aber nur die ohnehin ganz unsichere letzte Stelle der eben angegebenen Zahl beeinflussen kann, mag sie bei dieser Überschlagsrechnung ausser Betracht bleiben.

2. Berechnung aus den Gesetzen des Luftwiderstandes. Dieser Weg ist vorläufig noch nicht gangbar, weil diese Gesetze bei kompliziert gebauten und unregelmässig bewegten Flächen, zumal bei schrägem Auftreffen der Luft, erst sehr unvollkommen erforscht sind.

1) Die Rechnung gestaltet sich folgendermaassen: Die Masse m der in 1 Sek. bewegten Luft ist (numerisch) gleich ihrem Volum multipliziert mit ihrem spezifischen Gewicht b (bezogen auf Wasser), dividiert durch die Erdkonstante g . Das Volum des Luftprismas ist gleich der Grundfläche, die nach unserer Annahme der Flügelfläche F gleich sein soll, multipliziert mit dem in 1 Sek. zurückgelegten Wege, welcher wieder (numerisch) gleich der Geschwindigkeit v ist. Man hat also $m = \frac{F \cdot v \cdot b}{g}$. Wird dieser Wert in die Gleichung $G = m \cdot v$ eingesetzt, daraus v berechnet, und dieser Wert in die Gleichung $A(\text{Arbeit}) = \frac{Gv}{2}$ eingesetzt, so erhält man schliesslich $A = \frac{G}{2} \sqrt{\frac{Gg}{Fb}}$. (Damit diese Gleichung auch in den Dimensionen richtig wird, ist auf der rechten Seite der Faktor $gr^{-1/2} \cdot cm \cdot sec^2$ hinzuzufügen.) Daraus ergibt sich die obige Zahl unter Berücksichtigung der Werte $G = 350 \text{ g}$, $g = 981 \text{ cm/sec}^2$, $F = 600 \text{ cm}^2$, $b = 0,00123$.

3. Berechnung aus dem Wege des Druckmittelpunktes. Diese Berechnungsweise gründet sich auf folgende Überlegung: Wenn der Vogel während des Niederschlages nicht sinken will, muss er mit den Flügeln mit derselben Kraft gegen die Luft drücken, mit der er von der Erde angezogen wird. In diesem Fall wird er aber während des Aufschlages sinken. Nimmt man der Einfachheit wegen an, dass Niederschlag und Aufschlag gleich lange dauern, so muss der Vogel, um dieses Sinken zu verhindern, bei ersterem offenbar gegen die Luft einen Druck gleich seinem doppelten Gewicht ausüben. (Das wird noch klarer, wenn man sich ein vierflügliges Tier denkt, dessen eines Flügelpaar gesenkt wird, während das andere sich hebt. Dieses Tier muss dann beim Niederschlag jedes Flügelpaares einen Druck gleich seinem Gewicht ausüben.) Den Luftdruck auf den Flügel kann man sich im Druckmittelpunkt vereinigt denken, dessen Entfernung von der Drehungsachse, wie man berechnet hat, etwa $\frac{1}{2}$ der Flügellänge beträgt¹⁾. Die bei jedem Flügelschlage ausgeübte Kraft kennt man jetzt; da Arbeit = Kraft $\times$ Weg ist, hat man für die Arbeit einer Sekunde: Anzahl der Flügelschläge $\times$ doppeltem Körpergewicht $\times$ Weg des Druckmittelpunktes. Letzterer ist wieder leicht aus Flügellänge und Schlagwinkel zu berechnen. Eine Taube von 350 g Gewicht hat Flügel von 30 cm Länge; der Schlagwinkel beim ruhigen Flug beträgt etwa 50°, die Flugfrequenz etwa 8 pro Sek. Daraus folgt eine Leistung von 0,71 kgm, das sind 2,0 kgm pro kg. Auch diese Werte können nur angenähert gelten, weil der Niederschlag in Wirklichkeit längere Zeit dauert als der Aufschlag (dadurch wird die Flugarbeit verkleinert), und weil die Entfernung des Druckmittelpunktes von der Drehungsachse sich vielleicht periodisch ändert. Wahrscheinlich macht die Taube auch beim ganz unbeeinflussten Flug nicht acht Flügelschläge in der Sekunde, wie Marey angibt, sondern nur sechs. Berücksichtigt man dies alles, so ergibt sich als wahrscheinlicher Wert für eine Taube von 350 g 0,50 kgm oder 1,4 kgm pro kg.

4. Berechnung nach kinematographischen Aufnahmen. Diese Methode, die ich für nicht anwendbar halte, ist

1) J. J. PrechtI, Untersuchungen über den Flug der Vögel S. 184. Gerold, Wien 1846.

von Ch. M. de Labouret¹⁾ angegeben worden. Hat man die Bewegungskurve eines Körpers, deren Ordinaten die zurückgelegten Wege, deren Abszissen die Zeiten sind, so bezeichnet bekanntlich die Neigung der Tangente an irgendeiner Stelle die zu der betreffenden Zeit erreichte Geschwindigkeit. Konstruiert man jetzt die Geschwindigkeitskurve (die Abszissen bedeuten wieder Zeiten), so ist bei dieser die Tangentenneigung ein Maass der augenblicklichen Beschleunigung. [Kürzer ausgedrückt: aus der Kurve $s = f(t)$ lassen sich die Geschwindigkeit ds/dt und die Beschleunigung d^2s/dt^2 ermitteln.] Da nun Kraft = Masse $\times$ Beschleunigung ist, braucht man die so gefundenen Beschleunigungen nur mit der Masse des Vogels zu multiplizieren, um die in jedem Augenblick wirksamen Kräfte zu finden.

Soweit ist alles recht plausibel. Aber wir wollen ja nicht die Kräfte, sondern die Arbeiten kennen lernen. Hier begeht der Autor einen Trugschluss. Wie jeder mit solchen Problemen Vertraute ohne weiteres einsehen wird, ermittelt man aus der Kurve gar nicht die einzelnen Kräfte, sondern die Resultante derselben. Man findet von den beiden Horizontalkräften Luftwiderstand (der Bewegung entgegen) und Triebkraft (im Sinne der Bewegung) nur die Differenz, und ebenso ist es mit den drei Vertikalkräften Luftwiderstand (wahrscheinlich, aber nicht sicher, immer aufwärts wirkend), Triebkraft (Richtung vorwiegend aufwärts, manchmal vielleicht abwärts) und Schwere (immer abwärts). De Labouret setzt den horizontalen Luftwiderstand gleich einer bekannten Konstanten und vernachlässigt den Vertikalwiderstand. Auf diese Weise bleibt ausser der bekannten Schwere nur die vom Vogel gelieferte Triebkraft übrig; aus dieser ist dann leicht die Arbeit zu berechnen, indem man sie mit den aus der Kurve ermittelten Wegen multipliziert.

Dass diese Berechnungsart nicht zulässig ist, erhellt am besten aus einem Beispiel. Man denke sich einen fliegenden Körper, z. B. eine Flugmaschine, die sich durch besondere Vorrichtungen, z. B. eine senkrecht nach unten wirkende Luftschraube, unbeweglich an einer Stelle des Luftraumes zu erhalten vermag. Da ihr Schwerpunkt in Ruhe ist, wirken keine äusseren Kräfte auf sie, oder die Kräfte halten sich vielmehr das Gleichgewicht. Das sind: nach

1) Anhang zu E.-J. Marey, Le vol des oiseaux.
Pflüger's Archiv für Physiologie. Bd. 135.

oben die Triebkraft, nach unten die bekannte Schwere. Man kennt jetzt also aus dieser Gleichung die Grösse der Triebkraft; wie gross die vom Motor aufgewendete Arbeit ist, wird auch die sorgfältigste Ausmessung der kinematographischen Bilder (die ja alle identisch sind!) nicht feststellen können, denn das hängt ja nach 1. (s. S. 394) von der Geschwindigkeit des abwärts geschleuderten Luftstromes ab. Diese ist aus den Bildern nicht zu ersehen.

Diese Berechnungsmethode kann also keine brauchbaren Resultate liefern.

5. Berechnung aus dem Vergleich mit Flugmaschinen. Bekanntlich arbeiten unsere Muskeln etwa doppelt so günstig als unsere besten Kraftmaschinen. So können wir auch mit einiger Wahrscheinlichkeit annehmen, dass ein Vogel, auf gleiches Gewicht bezogen, höchstens halb so viel Arbeit leistet als die modernen Flugapparate.

Die Rekordleistungen¹⁾ sind bis jetzt:

Dorner: 24 PS., Gewicht des Apparates 260 kg, dazu Führer und Ballast 182 kg. Summa 442 kg; auf jede Pferdestärke kommen 18,4 kg.

Engelhardt (Wrightmaschine): 33 PS., Apparat 385 kg, Führer und Ballast 211 kg. Summa 596 kg oder 18,1 kg pro Pferdestärke.

Jedes Kilogramm braucht also im günstigsten Falle $\frac{1}{18,4}$ PS. = 4 kgm/sec zur Hebung. Nach unserer obigen Annahme werden wir deshalb beim Vogel einen Aufwand von 2 kgm pro kg vermuten müssen. Ich halte das auch nur für einen oberen Grenzwert, da der Wirkungsgrad der Flugmaschine wahrscheinlich noch sehr verbesserungsfähig ist.

Nun bleiben noch zwei physiologische Methoden übrig.

6. Feststellung der Leistungsfähigkeit der Muskeln. Nach dieser Methode müsste man die grösste Arbeit bestimmen, die ein gewisser Bruchteil der Flugmuskulatur längere Zeit hindurch ohne merkliche Ermüdung zu leisten vermag. Wenn man diesen Betrag auf die gesamte Flugmuskulatur umrechnete, so erhielte man wieder einen oberen Grenzwert für die Flugarbeit.

¹⁾ Diese Angaben verdanke ich der Liebenswürdigkeit des Herrn Hauptmann a. D. Hildebrandt in Berlin, dem ich auch an dieser Stelle bestens dafür danke.

Denn beim gewöhnlichen Fluge strengt der Vogel seine Kräfte natürlich nicht bis zum äussersten an.

Diese Methode ist noch nicht systematisch angewendet worden. Ich habe gezeigt, dass ein Flügelmuskel der Taube längere Zeit ohne merkliche Ermüdung mit solcher Belastung und in solchem Rhythmus arbeiten kann, dass sich daraus für die gesamte Flugmuskulatur eine Leistung von 0,5—1,0 kgm/sec ergibt. Nimmt man wieder 350 g als Durchschnittsgewicht, so kommt auf das Kilogramm 1,4—2,9 kgm/sec, im Durchschnitt also wieder etwa 2 kgm/sec.

7. Berechnung aus Stoffwechselversuchen. Man könnte aus dem vermehrten Stoffumsatz beim Fluge des Vogels Schlüsse auf die Leistung ziehen, wie man es öfters beim Säugetier getan hat. Solche Versuche hat Pütter angestellt, aber darüber ausser auf einer Wandtafel in der Frankfurter Internationalen Ausstellung für Luftschiffahrt („Ila“) noch nichts veröffentlicht. Es ergaben sich mit dieser Methode, wie mir Herr Professor Pütter in liebenswürdiger Weise brieflich mitgeteilt hat, für die Taube ungefähr Werte von 0,5 kgm/sec pro kg.

Stellen wir jetzt unsere Resultate zusammen, so erhalten wir folgende Werte für den Arbeitsaufwand beim Flug, bezogen auf 1 kg Tier:

a) aus dem Raketenprinzip (sicher zu hoch)	3,4 kgm/sec,
b) „ „ Weg des Druckmittelpunktes	1,4 „
c) „ „ Vergleich mit Flugmaschinen (wohl zu hoch) 2,0	„
d) „ Arbeitsversuchen	2,0 „
e) „ Stoffwechselversuchen	0,5 „

Bei der Verwertung dieser Zahlen werden wir berücksichtigen müssen, dass der Vogel, wie jedes andere Tier, bei seiner Tätigkeit selbstverständlich nicht immer dieselbe Arbeit leistet. Es ist bekannt, dass z. B. der Beginn des Fluges mit besonders grosser Anstrengung verknüpft ist; Marey (l. c., p. 331) gibt an, dass Tiere, die man mehrere Male kurz hintereinander losfliegen lässt und dann immer gleich wieder einfängt, bald alle Symptome grosser Erschöpfung zeigen. Er schätzt den Arbeitsaufwand unter solchen Umständen auf das Vier- bis Fünffache desjenigen, der für den ruhigen Flug benötigt wird.

Die besprochenen Methoden ausser der letzten geben im allgemeinen obere Grenzwerte; besonders der physiologische Versuch zeigt uns, was der Muskel leisten kann. So werden wir wohl

nicht fehlgehen, wenn wir aus unseren Zahlen den Schluss ziehen, dass 1,5–2 kgm/sec, bezogen auf 1 kg Körpergewicht, die grösste Arbeit ist, die eine Taube längere Zeit leisten kann; für den ruhigen Flug werden wir ungefähr 0,5 kgm anzusetzen haben. Wie diese Werte bei kleineren oder grösseren Vögeln zu modifizieren sind, soll hier nicht weiter untersucht werden.

Man kann diese Resultate noch anschaulicher machen, wenn man sie in Hebearbeit ausdrückt. Eine Taube könnte mittels ihrer Flugmuskulatur ein Gewicht gleich ihrem Körpergewicht in jeder Sekunde 0,5 (ruhiger Flug) bis 2 m (maximale Anstrengung) hoch heben.

Es ist von Interesse, damit die menschlichen Leistungen zu vergleichen. A. Durig¹⁾ hat es bei grösster Übung zu einer längere Zeit dauernden Leistung von 0,29 PS. gebracht (Körpergewicht 63 kg). Das ist eine Leistung von 0,35 kgm pro Kilogramm Körpergewicht, oder ebensoviel, als ob er sein eigenes Körpergewicht in jeder Sekunde 0,35 m hoch gehoben hätte. Wie man sieht, ist damit die Normalleistung der Taube noch nicht erreicht.

Aus diesen Betrachtungen können wir den Schluss ziehen, dass der normale Vogelflug etwa doppelt so viel Arbeit erfordert, als der sehr gut trainierte Mensch (das gilt wohl auch von anderen Säugetieren) bei gleichem Gewicht leisten könnte. Damit harmoniert aufs beste der lebhaft Stoffwechsel der Vögel und die relative Grösse ihres Herzens²⁾.

1) A. Durig, Pflüger's Arch. Bd. 113 S. 4.

2) J. Stroh, Zool. Jahrbücher, Abt. f. allg. Zool. u. Physiol. Heft 1.