

„DER VOGELFLUG ALS GRUNDLAGE DER FLIEGEKUNST“ DIE ERFOLGREICHE UMSETZUNG EINES BIONISCHEN KONZEPTS

B. Lukasch, Otto-Lilienthal-Museum, 17389 Anklam, Deutschland

Zusammenfassung

Lilienthals Buch „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“ gilt heute als die wichtigste flugtechnische Veröffentlichung des 19. Jahrhunderts. Seine Veröffentlichung im Jahr 1889 stellt den Abschluss der von Lilienthal geschaffenen physikalischen Grundlagen des Flügels und die Grundlage für den unmittelbar nach der Veröffentlichung beginnenden Flugzeugbau und die praktischen Flugübungen dar. Mit der methodischen Konsequenz seines Vorgehens hat Lilienthal in einem durch die Luftschiffahrt dominierten Umfeld den sowohl wissenschaftlich als auch praktisch vermutlich einzig möglichen Zugang zur Erforschung des Phänomens Fliegen gefunden und erfolgreich umgesetzt.

DAS BUCH ZUM FLUGZEUG

Als Geburtsstunde bedeutender Erfindungen oder grundlegender Entwicklungen in der Wissenschaft gilt häufig ein Patent oder eine Publikation, welche die Ersterwähnung der für die entsprechende Entwicklung zentralen und grundlegenden Erkenntnisse enthält. Will man für das heutige Flugzeug einer Veröffentlichung diesen Rang einer Wiegen-schrift zubilligen, so gebührt dieser sicher Otto Lilienthals „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“, 1889 veröffentlicht und mit folgenden Untertiteln versehen: „Ein Beitrag zur Systematik der Fliegekunst. Auf Grund zahlreicher von O. und G. Lilienthal ausgeführter Versuche, bearbeitet von Otto Lilienthal, Ingenieur und Maschinenfabrikant in Berlin.“¹ Auf 187 Seiten stellt Lilienthal die Kulturgeschichte des



Flugtraums und -wunsches des Menschen auf die Grundlage der gültigen Mechanik ohne dem Thema die anthropologische Aura zu nehmen. Die Einleitung des formel- und

diagrammreichen

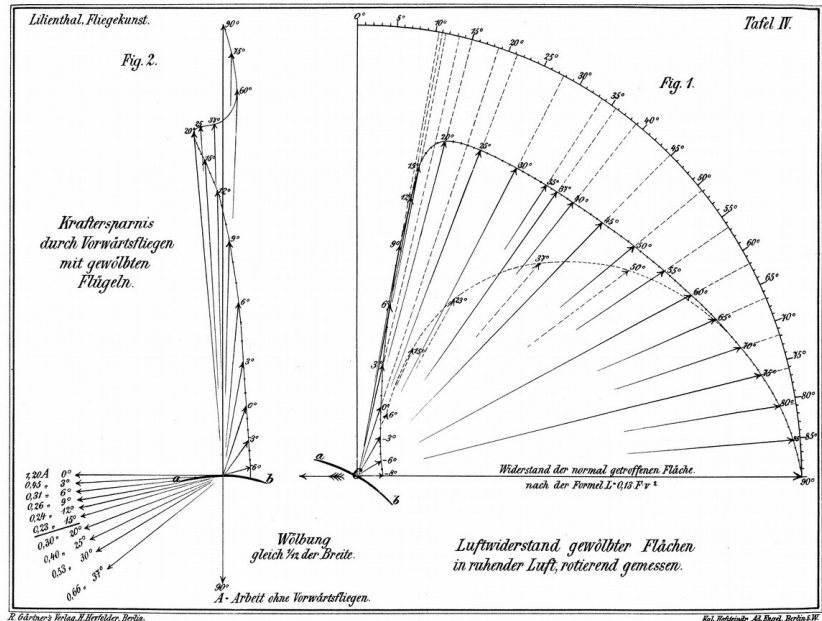
Buches beginnt literarisch mit den Worten: „Alljährlich, wenn der Frühling kommt, und die Luft sich wieder bevölkert mit unzähligen frohen Geschöpfen ...“. Es enthält auch im physikalischen Text einige lyrische Passagen, die heute an Lilienthal-Denkmalen zitiert sind. Lilienthal formuliert seine Absicht im Vorwort: „Ich habe die Absicht gehabt, nicht nur für Fachleute, sondern für jeden Gebildeten ein Werk zu schaffen, dessen Durcharbeitung die Überzeugung verbreiten soll, dass wirklich kein Naturgesetz vorhan-

den ist, welches wie ein unüberwindlicher Riegel sich der Lösung des Fliegeproblems vorschiebt.“ Später nennt Lilienthal sein verwirklichtes Flugzeug auch ein

„Kulturelement“ und verbindet seine weitere Entwicklung mit der Vision eines weltumspannenden Luftverkehrs und der sich durch diesen eröffnenden Möglichkeit des ewigen Friedens.²

Das Buch vollzieht den von Lilienthal selbst über mehr als zwei Jahrzehnte verfolgten Erkenntnisweg nach, der, ausgehend von der Tatsache des Vogelfluges, nach dessen physikalischer Beschreibung und der darauf basierenden Möglichkeit seiner technischen Nachahmung sucht. Lilienthal illustriert den Text mit 80 Holzschnitten und die quantitativen Ergebnisse mit acht großformatigen lithografischen Tafeln. Diese beinhalten das heutige Konzept des Polardiagramms und, in verschiedene Risse des Flugapparates des Weißstorchs projiziert, die gewölbte Tropfenform als von der Natur suggeriertem grundlegenden Flügelprofil. Im Buch wird das bis heute gültige Konzept der physikalischen

Beschreibung des künstlichen Flügels, der Tragfläche entworfen. Lilienthal stellt die Richtung der Luftkraftresultierenden grafisch

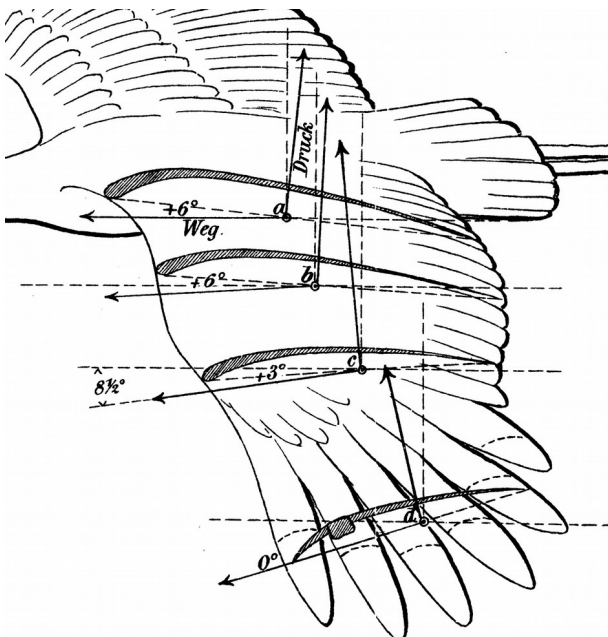


Tafel IV: Polardiagramm gewölbter Flächen

dar und zerlegt diese relativ zum Flügel in die von ihm so genannten Komponenten „hebender“ und „hemmender“ Luftwiderstand. Er stellt die systematisch aufbereitete Abhängigkeit der Polardiagramme von der Flügelwölbung bei unveränderter, vom Vogel inspirierter linsenförmiger Flügelform grafisch dar und sucht die Ursache für die überraschenden Eigenschaften gewölbter Flächen in den zu Grunde liegenden Strömungsvorgängen. Das heute auch „Lilienthal-Polare“ genannte „Polardiagramm“ ist Lilienthals grafische Antwort auf das von ihm mit der Formel „Alles Fliegen beruht auf Erzeugung von Luftwiderstand, alle Flugarbeit besteht in Überwindung von Luftwiderstand“³ beschriebene physikalische Problem des Fliegens.

ZUR GESCHICHTE DES BUCHES

Zu erwähnen ist, dass das mit dem Buch publizierte physikalische Konzept nicht das Ergebnis der beruflichen oder wenigstens hauptsächlichen Tätigkeit Otto Lilienthals, sondern das einer nebenberuflich verfolgten Passion ist. Lilienthals flugtechnische Ambitionen lassen sich bis in die früheste Jugend zurückverfolgen. Die Ergebnisse von



beim Niederschlag.

Ausschnitt aus Tafel VIII: Profile am Storchflügel

Versuchen, die er als Student gemeinsam mit seinem Bruder unternahm, finden sich noch

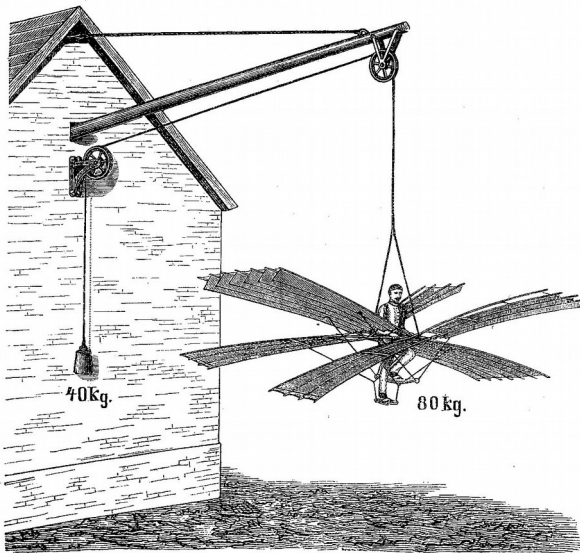


Fig. 10.

Flügelschlagexperiment der Studenten Otto und Gustav Lilienthal in Altwigshagen in der Nähe ihres Geburtsortes Anklam. Abbildung auf S. 43 des Buches über den Vogelflug

nach über 20 Jahren als erstes detailliert und quantitativ beschriebenes Experiment im Buch wieder.

Die erste bekannte flugtechnische Veröffentlichung Lilienthals ist ein Vortrag, den er im Dezember 1873 vor dem Gewerbeverein in Potsdam hielt. Lilienthal spricht über die „Theorie des Vogelflugs“. Der Vortrag hat den Charakter eines wissenschaftlichen Programms. Lilienthal beschäftigt sich besonders mit der Kritik des Ballons und mit der Notwendigkeit den Vogelflug zu studieren. Beide Brüder waren, veranlasst durch einen beruflichen Aufenthalt des Bruders in London, Mitglieder der "Aeronautical Society of Great Britain" geworden. Lilienthal verweist auf diese und führt aus: "Die Fliegekunst ist wenig geeignet, nach der Art des Schießpulvers erfunden zu werden. Aus diesem Grunde ist es eben schade, dass gerade die Engländer und nicht die mehr theoretischen Deutschen auf den Gedanken verfielen, einen Aeronautischen Verein zu gründen".⁴ Lilienthal führt während des Vortrags eigene Flügelschlag-Modelle vor.

Für das Jahr 1874 sind umfangreiche Versuchsserien an Rundlaufapparaten und Apparaten zur Windkraftmessung im natürlichen Wind überliefert, die offenbar bereits die wesentlichen Erkenntnisse des Buches zum Ergebnis haben. Im Vorwort des 15 Jahre später erscheinenden Buches heißt es: „Diese Versuche, über einen Zeitraum von 23 Jahren sich erstreckend, konnten jetzt zu einem gewissen Abschluss gebracht werden, indem durch die Aneinanderreihung der Ergebnisse ein geschlossener Gedankengang sich herstellen ließ, welcher die Vorgänge beim Vogelfluge einer Zergliederung unterwirft, und dadurch eine Erklärung derselben, wenn auch nicht erschöpfend behandelt, so doch anbahnen hilft.“⁵



In der nachgelassenen Bildersammlung Lilienthals befanden sich mehrere der legendären Fotografien fliegender Störche des Fotografen Ottomar Anschütz aus dem Jahr 1884

Lilienthal beschreibt die Beschäftigung mit dem Flugthema als kontinuierlichen Prozess, obwohl in den Jahren nach 1874 offenbar seine berufliche Entwicklung als Maschinenbauingenieur in verschiedenen Anstellungen, seine Erfindungen auf dem Gebiet des Maschinenbaus, die 1883 die Gründung einer eigenen Maschinenbaufirma ermöglichen, und nicht zuletzt die Gründung einer Familie im Vordergrund stehen.

Erst 1888 und 1889 stellt Lilienthal in drei zusammenhängenden Vorträgen unter dem Titel „Der Kraftaufwand beim Vogelflug“⁶ vor dem Verein zur Förderung der Luftschiffahrt⁷ die wesentlichen, ein Jahr später in Buchform publizierten Erkenntnisse vor. Das Protokoll vermerkt: "Das Interesse des Vereins an den interessanten Versuchen der Herren Lilienthal

findet auf Antrag des Vorsitzenden Ausdruck durch Erheben von den Sitzen".⁸ Den Vorträgen vorausgegangen ist ein umfassendes Versuchsprogramm, welches die früheren Resultate mit vergrößerten Apparaturen erfolgreich zu bestätigen suchte. Lilienthal beschreibt dieses Anliegen selbst in einem Brief an August Platte, einem der Gründer des Wiener Flugtechnischen Vereins und entschiedenem Kritiker Lilienthals: „Der Inhalt meines Werkes weist so viel Neues und Abweichendes von den gewöhnlichen Annahmen und Anschauungen auf, daß ich von vornherein auf den vielseitigsten Widerspruch rechnen durfte. Letzteres war aber auch der Grund, weshalb ich nicht früher mit den gefundenen Resultaten an die Öffentlichkeit trat, als bis das gesamte Material in abgerundeter Form sich geben ließ und meiner Ansicht nach die Folgerichtigkeit des einen Resultates aus dem anderen hervorging. Bis vor etwa fünf Jahren waren aber bereits die hauptsächlichsten Ergebnisse unserer Forschungen festgestellt, nachdem wir etwa 20 Jahre lang den Haupttheil unserer gesamten freien Zeit seit unseren Studienjahren dem Flugproblem gewidmet hatten, als ich bei Gründung meines eigenen Heimes in Lichterfelde bei Berlin die Vorkehrungen traf, um die gesamten Fundamentalversuche noch einmal mit neuen besseren Apparaten und im größeren Maßstabe im zweckdienlichen Zusammenhang von neuem wieder in Gemeinschaft mit meinem Bruder durchzuführen, damit eine möglichst scharfe Controlle über das bereits Gefundene stattfindet.“⁹

VOM „LADENHÜTER“ ZUR BIBLIOPHILEN KOSTBARKEIT

Offenbar musste Lilienthal die Kosten für den Druck des Buches selbst übernehmen und *R. Gaertners Verlagsbuchhandlung* übernahm lediglich den Vertrieb des Buches. Erhalten ist eine Rechnung des Xylographischen Ateliers Robert Franke an Lilienthal, in dem diesem für

die Herstellung von 59 Holzschnitten 359 Mark und 40 Pfennige in Rechnung gestellt



KREISENDE STORCHFAMILIE.

Lilienthals Aquarell "kreisende Storchfamilie" steht in separatem Farbdruck am Anfang des Buches.

werden.¹⁰ Für die genannte Geschäftsbeziehung spricht ebenfalls eine erhaltene Abrechnung des Verlages mit Lilienthal aus dem Jahre 1893.¹¹ Lilienthal erhält für den Jahresabsatz von 20 verkauften Exemplaren 100 Mark. Abzüglich weiterer vier Exemplare, die der Autor selbst erhalten hat, beträgt der „gegenwärtige Vorrath“ 820 Exemplare, was einem Großteil der Auflage entspricht. Das Autorenhonorar von fünf Mark ist vermutlich ein hoher Anteil des

Verkaufspreises des Buches, der, wenn überhaupt, möglicherweise nur um einen Unkostenbeitrag des Verlages höher gelegen haben dürfte.

Es ist davon auszugehen, dass ein beträchtlicher Teil der Auflage von Lilienthal selbst abgegeben und verschickt wurde. Bestätigungen des Empfangs übersandter Exemplare sind aus dem November 1889 erhalten. Am 10. November 1889 bedankt sich Wilhelm Angerstein, der Redakteur der *Zeitschrift für Luftschiffahrt* für „die gütige Übersendung Ihrer vortrefflichen Schrift über den Vogelflug“.¹² Eine Rezension erscheint in seiner Zeitschrift im Dezemberheft, verfasst von Karl Müllenhoff, dem Vorsitzenden des Vereins. In der Rezension heißt es: „Nun lassen sich aber, das zeigten die zahlreichen Untersuchungen der Mathematiker und Physiker, die so ausserordentlich komplizierten Widerstände am bewegten Vogelflügel nicht am Studiertische berechnen; nur der Versuch [...] konnte wirklich brauchbare, praktisch anwendbare Ergebnisse liefern. Das Verdienst, derartige Versuche zuerst angestellt zu haben, gebührt dem Ingenieur O. Lilienthal.“¹³

Im Jahr 1905 erscheint Lilienthals Buch auf Initiative des Moskauer Mathematikers und späteren Aerodynamikers Nikolai Jegorowitsch Schukowski in russischer Übersetzung. Schukowski hatte bereits im Jahre 1896 einen Flugapparat von Lilienthal für die Moskauer Universität erworben. Das Buch wird in mehreren Fortsetzungen in den Jahren 1905 und 1906 in der *Zeitschrift der Russischen Technischen Gesellschaft* abgedruckt.¹⁴

Im Jahr 1910 erscheint eine zweite veränderte Auflage des Buches in Deutschland. Im Vorwort schreibt Gustav Lilienthal: „Zwanzig Jahre sind seit dem Erscheinen der ersten Auflage verstrichen. Ganz langsam führte sich dasselbe ein, bis die Fachleute den Wert des Inhalts schätzen lernten“.

Gustav Lilienthal hat dem Buch zwei zusätzliche Kapitel hinzugefügt. Einerseits musste der Tatsache der auf das Erscheinen der ersten Auflage folgenden erfolgreichen Flugpraxis Lilienthals Rechnung getragen werden. Andererseits sollte das Buch den

aktuellen Stand der Flugzeugentwicklung des Jahres 1910 widerspiegeln. Deshalb ist dem Buch das Kapitel „Die Entwicklung“ vorangestellt. Auf 24 Seiten wird Lilienthals Flugtechnik in den Jahren 1891 bis 1896 behandelt. Das in der ersten Auflage enthaltene Aquarell fliegender Störche von Otto Lilienthal wurde durch ein Portrait Lilienthals ersetzt und einige handschriftliche stilistische Korrekturen, die Otto Lilienthal bereits in einem persönlichen Exemplar vorgenommen hatte, wurden berücksichtigt. Als Anhang enthält das Buch jetzt ein Kapitel „Nachtrag. Gleitflieger und Flugmaschinen, verglichen mit unseren Messungen.“ Die zahlreichen nachfolgenden Auflagen reproduzieren jedoch fast alle wieder die Originalausgabe.

Die dritte Auflage erscheint 1938 als Faksimile der ersten Auflage mit den erwähnten handschriftlichen Ergänzungen Lilienthals. Auf dem Schutzumschlag heißt es: „Die Faksimile-Wiedergabe eines bedeutenden Originalwerkes ist in dieser Form für ein technisches Buch wohl erstmalig.“ Das Vorwort schreibt der deutsche Aerodynamiker Ludwig Prandtl. Weitere Auflagen erscheinen im Jahr 1943 und Neu- bzw. Nachdrucke in den Jahren 1965 und 1977. Der letzte enthält ein Geleitwort von Theodor Heuss: „Der literarische Vortrag des Buches ist eine eigentümliche Mischung von nüchterner Beobachtung, vorsichtiger Umschreibung der Ergebnisse und dem durchwärmten Pathos eines Enthusiasten. Die Fachleute, Mechaniker und Physiker, sollten es lesen, überprüfen, die neugestellten Fragen weiterdenken und dem Versuch unterwerfen; aber Otto Lilienthal meinte, da er selber von dieser Sache so besessen war, es würde auch eine allgemeinere Teilnahme an seinem Bemühen zu gewinnen sein. Wird nicht auf allen Schulen die Geschichte von Dädalus und Ikarus gelesen? Doch das Buch weckte 1889 kaum ein Echo.“¹⁵

Es ist zu konstatieren, dass die große zeitgenössische Aufmerksamkeit, die Lilienthal entgegengebracht wurde, ebenso wie die heutige Wertschätzung seines Buches kaum auf dessen Veröffentlichung, sondern fast ausschließlich auf seine zwei Jahre später beginnenden praktischen Flugversuche und die in den Folgejahren zur viel

fotografierten und publizierten unbezweifelten Tatsache gewordene Flugpraxis als Bestätigung seiner theoretischen Vorarbeit zurückgeht. Erst Lilienthals praktische Erfolge weckten das Interesse für die von ihm publizierten Grundlagen.

Bis in jüngste Zeit sind weitere Nachdrucke und Neuauflagen erschienen. Der inzwischen traditionsreiche *Oldenbourg-Verlag*, der Herausgeber der zweiten Auflage war, stellte 1996, zum 100. Todestag Lilienthals, eine Faksimile-Ausgabe seiner zweiten Auflage aus dem Jahr 1910 her. Der Verlag Steffen-Druck besorgte im Jahr 2003 gemeinsam mit dem Otto-Lilienthal-Museum eine Reprint-Ausgabe, die, wie die dritte und vierte Auflage, auch im äußeren Erscheinungsbild dem Original entspricht. In der Reihe „Klassische Texte der Wissenschaft“ erschien im Jahr 2014 im Verlag *Springer Spektrum* eine ausführlich kommentierte Ausgabe des Werkes.¹⁶

Die wenigen erhaltenen Exemplare der Erstausgabe gelten inzwischen als bibliophile Kostbarkeiten, die bei Auktionen bedeutende Ergebnisse erzielen.

GRUNDLEGENDE ERKENNTNISSE UND OFFENE FRAGEN

Obwohl Lilienthals praktische Flüge seine theoretischen Grundlagen glänzend bestätigten, wurden seine Erkenntnisse keineswegs umgehend zum Stand der Wissenschaft. Lilienthal beklagt diese Tatsache vier Jahre später mit den Worten: „Unsere Erwartung, dass nach Veröffentlichung unserer Resultate, welche doch die Behandlung des Flugproblems in ganz anderem Lichte erscheinen lassen mussten, sehr bald Proben auf die Richtigkeit der von uns angebahnten neuen Gesetze gemacht werden würden, hat sich insofern nicht erfüllt, als unsere Ergebnisse bis auf die neuere Zeit vereinzelt dastanden und erst jetzt durch die neueren Arbeiten von Wellner¹⁷ und Phillips¹⁸ eine Bestätigung fanden. Der ebene Flügel scheint aber dennoch nicht

so bald von der Bildfläche verschwinden zu sollen.“¹⁹

Wie Recht Lilienthal mit dieser Einschätzung hatte beweist zum Beispiel eine Arbeit des Österreichers Josef Popper, in der es noch im Jahr 1896 heißt: „Ich entscheide mich gegen die Lilienthalschen Angaben („der Vogelflug“ S. 63 u. s. f.), weil alle anderen Versuchsergebnisse den seinigen widersprechen.“²⁰ Und noch 1902 beklagt die *Fachzeitschrift Illustrierte Aeronautische Mitteilungen*, dass „nun immer noch die Theorie vom Nutzen der gewölbten Fläche für Flugmaschinen mit der Autorität seines Namens gedeckt wird, während bei noch längerem Wirken jenes bewunderungswürdigen Mannes ganz gewiss doch durch seine eigenen Experimente die Unnötigkeit oder wenigstens die übertriebene Betonung dieser Theorie bestätigt worden wäre.“²¹

Anlässlich der dargestellten Bedeutung des Lilienthalschen Buches ist es keineswegs despektierlich, dennoch nach dessen Grenzen, Fehlern oder Fehleinschätzungen zu fragen. Bereits von den Gebrüdern Wright kritisierte Abweichungen absoluter Zahlenwerte von heute verwendeten sind bereits ausführlich diskutiert.²² Jüngste, im vorliegenden Band dargestellte Untersuchungen an der Replik der von Lilienthal „Normalsegelapparat“ genannten Standardkonstruktion²³ seines Gleitflugzeugs haben ein neues Licht auf die bisher eher unterbewertete Leistung Lilienthals auf dem Gebiet der Flugmechanik geworfen. Dabei wird klar, dass Lilienthals flugtechnische Erfolge sich keineswegs, wie von ihm zunächst angenommen, mit der bloßen geschickten Anwendung der gewonnenen und



Lilienthals "kleiner Flügelschlagapparat" aus dem Jahr 1894

in seinem Buch zusammenfassend dargestellten Erkenntnisse einstellten.

Lilienthal hat mit seiner konsequenten Überführung der Untersuchung des Vorbildes Vogel ins Laborexperiment das „Geheimnis“ des Flügels entschlüsselt und die Grundlagen für die Tragflügelaerodynamik gelegt. Seine Annahme, dass damit das Problem des Menschenfluges im Wesentlichen gelöst sei und das Vorbild Vogel ebenso hilfreich bei der Verwirklichung des praktischen Fluges des Menschen sei, stellte ihn vor vermutlich unerwartete Schwierigkeiten. Diese führten zu einem völlig neuen, nun flugmechanischen Forschungsprogramm, welches die Grundform heutiger Flugzeuge mit Höhen- und Seitenleitwerk, das Prinzip des Doppeldeckers, verschiedene Klappen- und andere Steuerexperimente und die Gewichtssteuerung des heutigen Hängegleiters zum Ergebnis hatte. Der Würdigung dieser weiteren, über den Inhalt des Buches hinausgehenden Leistung Lilienthals ist der Artikel von A. Dillmann in diesem Heft gewidmet.

Es gibt Hinweise, dass Lilienthal über diesen Teil seiner Arbeiten ein weiteres Buch, das dann die Grundlagen seiner flugmechanischen Erkenntnisse enthalten hätte, plante. In einer unter vermissten stenographischen Aufzeichnungen erhaltenen unvollendeten Manuskriptseite findet sich der Absatz: „So wie das früher herausgegebene Werk den Elementarversuchen und theoretischen Entwicklungen galt, so sollen in dem vorliegenden Werke praktische Experimente erörtert werden, welche als eigentliche Flugversuche bereits bezeichnet werden können.“²⁴

Aus heutiger Sicht auffällig ist weiter, dass Lilienthal in seinem Buch keine vertikalen Luftströmungen in Betracht zieht. Selbst der spätere Artikel „Der Flug der Vögel und des Menschen durch die Sonnenwärme“²⁵ sieht als grundlegend für den Segelflug einen Gradienten der horizontalen Windgeschwindigkeit, keine vertikalen Strömungen, keine thermischen Aufwinde.

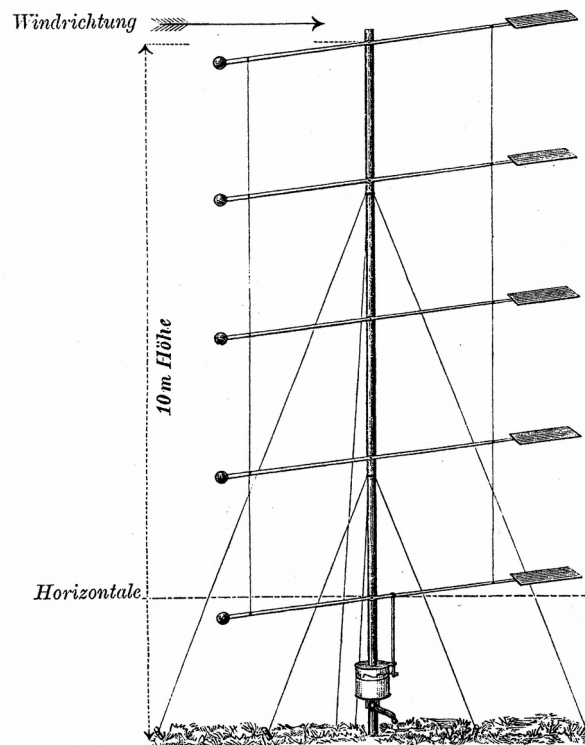


Fig. 51.

Abbildung 51: Apparatur zur Messung einer aufsteigenden Komponente des Windes.

Ein beachtlicher Teil des Buches befasst sich mit dem Mechanismus des schlagenden Flügels, den Lilienthal als Antriebsform prädestinierte. Spielte der Antrieb durch Flügelschlag dann, in der folgenden Entwicklung der Luftfahrt auch keine Rolle, würdigen jüngste erfolgreiche Arbeiten zu einem verwirklichten Biegetorsionsantrieb²⁶ des Flügels Lilienthals Arbeiten auch auf diesem Gebiet.²⁷

Die in Lilienthals Buch vorgeschlagene und in den Folgejahren weiterentwickelte grundlegende Gleitflugzeugform wurde durch die Flügelfläche des Amerikaners Francis Melvin Rogallo²⁸ in den 1960-er und 1970-er Jahren revolutioniert. Die einfache effektive Flügelform und der tiefer liegende Schwerpunkt ermöglichten mit dem modernen Hängegleiter die Wiedergeburt der Flugtechnik Lilienthals. Rogallo selbst nennt jedoch die einfache Grundform eher einen Zufallsfund beim Experimentieren mit einem quadratischen Stoffstück als das Ergebnis anwendungsorientierter Forschung.²⁹ Damit wurde auch

Lilienthals zunächst aufgegebenes Prinzip der Gewichtskraftsteuerung mit dem Hängegleiter zum Auslöser einer neuen Sparte der Luftfahrt.

WEITERFÜHRENDE QUELLEN:

Eine ausführliche Kommentierung des Buches sowie die Beschreibung der Geschichte seiner Entstehung enthält die kommentierte Neuauflage des Buches aus dem Jahr 2014.³⁰

Viele der im Folgenden angegebenen Originalquellen sind als Faksimile oder Transkription im Online-Archiv des Otto-Lilienthal-Museums verfügbar:

<http://lilienthal-museum.museumnet.eu/nachlass-lilienthal>

- [1] O. Lilienthal: Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst. Ein Beitrag zur Systematik der Flugtechnik“, R. Gaertners Verlagsbuchhandlung, Berlin 1889.
- [2] In einem Brief führt Lilienthal seine Vorstellung aus: „Mit Begeisterung habe ich oft Ihren Worten gelauscht, in denen Sie die Grenzen nicht als Trennung, sondern als die Verbindung der Länder bezeichneten. Auch ich habe mir die Beschaffung eines Kulturelementes zur Lebensaufgabe gemacht, welches Länder verbindend und Völker versöhnend wirken soll. Unser Kulturleben krankt daran, daß es sich nur an der Erdoberfläche abspielt. Die gegenseitige Absperrung der Länder, der Zollzwang und die Verkehrserschwerung ist nur dadurch möglich, daß wir nicht frei wie der Vogel auch das Luftreich beherrschen.
Der freie, unbeschränkte Flug des Menschen, für dessen Verwirklichung jetzt zahlreiche Techniker in allen Kulturstaaten ihr Bestes einsetzen, kann hierin Wandel schaffen und würde von tief einschneidender Wirkung auf alle unsere Zustände sein.
Die Grenzen der Länder würden Ihre Bedeutung verlieren, weil sie sich nicht mehr absperren lassen; die Unterschiede der Sprachen würden mit der zunehmenden Beweglichkeit der Menschen sich verwischen. Die Landesverteidigung, weil zur Unmöglichkeit geworden, würde aufhören, die besten Kräfte der Staaten zu verschlingen, und das zwingende Bedürfnis, die Streitigkeiten der Nationen auf andere Weise zu schlichten als den blutigen Kämpfen um die imaginär gewordenen Grenzen, würde uns den ewigen Frieden verschaffen.“ O. Lilienthal in: Brief an Moritz von Egidy, undatiert, vermutlich Anfang 1894, Deutsches Technikmuseum Berlin, Feldhaus-Archiv Nr. 52.
- [3] O. Lilienthal: „Der Vogelflug ...“ a. a. O. S. 33.
- [4] O. Lilienthal: „Theorie des Vogelfluges“, Vortragsmanuskript, Deutsches Museum HS 6256.
Transkription im Archiv des Otto-Lilienthal-Museums:
<http://lilienthal-museum.museumnet.eu/archiv/objekt/322>.
- [5] O. Lilienthal: „Der Vogelflug ...“ a. a. O. S. IV.
- [6] O. Lilienthal: „Der Kraftaufwand beim Vogelfluge und sein Einfluss auf die Möglichkeit des freien Fliegens“, Vorträge vor dem Verein zur Förderung der Luftschiffahrt, 29. 10. 1888, 18. 2. und 15. 4. 1889. In: Zeitschrift für Luftschiffahrt Nr. 7 S. 349-352, Nr. 8, S. 123 und S. 245 f.
- [7] Der 1881 gegründete Verein war die erste Fachorganisation für Luftfahrt, mit deutlicher Zielsetzung auf die Lösung des Problems der Herstellung lenkbarer Luftschiffe. Ab 1882 erschien die Zeitschrift des Vereins als erste deutsche Fachzeitschrift für Luftfahrt, ab 1892 unter dem Titel „Zeitschrift für Luftschiffahrt und Physik der Atmosphäre“.
- [8] Sitzungsprotokoll vom 29. Oktober 1888. In: Zeitschrift für Luftschiffahrt 1888, S. 352.
- [9] O. Lilienthal: Brief an August Platte, 5. Mai 1890. Deutsches Museum, Sondersammlungen HS 6259.
- [10] Rechnung des Xylographischen Ateliers von Robert Franke Berlin an Otto Lilienthal vom 31. Oktober 1889, handschriftlich auf gedrucktem Rechnungsbogen, Otto-Lilienthal-Museum Inv.-id: 9278-1-007-6.
- [11] Brief auf Firmenbriefbogen „Gaertners Verlagsbuchhandlung“ an Otto Lilienthal vom 19. August 1893, Otto-Lilienthal-Museum Archiv-id: 7024.
- [12] Otto-Lilienthal-Museum Inv.-id: 9278/1/007/1 und andere.
- [13] K. Müllenhoff: Literarische Besprechungen. In: Zeitschrift für Luftschiffahrt 1889, S. 286.
- [14] „Записки Императорского Русского Технического Общества - печатное издание Русского технического общества“ (Schriften der Hohen Russischen Technischen Gesellschaft), Heft 6 ff. Der Titel ist identisch, jedoch mit dem veränderten Untertitel "... Versuche der Brüder O. u. G. Lilienthal, Ingenieure und Maschinenbauer in Berlin." „Переветь: Е. С. Федоров, предложение къ запискамъ Императорского русского технического общества“ (Übersetzer: E. S. Fedorow). Ein Reprint erschien 2002, eine Neuauflage im gleichen Jahr.
- [15] übernommen aus: Heuss, Theodor: „Deutsche Gestalten. Studien zum 19. Jahrhundert.“ Tübingen 1951.
- [16] O. Lilienthal: „Der Vogelflug ...“. Kommentierte Neuauflage: B. Lukasch (Hrsg.) In: Klassische Texte der Wissenschaft, Springer Spektrum, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014.
- [17] Wellner, Georg (1846–1909), österreichischer Techniker und Hochschullehrer, veröffentlichte zahlreiche Arbeiten über Flugtechnik.

- [18] Obwohl Lilienthal als der Entdecker der Eigenschaften der gewölbten Fläche gilt, war ihm der Engländer Warren Phillips zuvor gekommen. Sein Patent „Apparatus for Aerial Navigation“, Her Majesty's Stationary Office Patent Nr. 13,768, 17. 10. 1884 beschreibt ein gewölbtes Flügelprofil. Es ist unbekannt, ob Lilienthal die Arbeit kannte. Auch ein Flugzeugentwurf des Engländers William Samuel Henson („Locomotive Apparatus for Air, Land and Water“, Britisches Patent Nr. 9478 vom 29. 9. 1842) hatte gewölbte Flügelprofile, ohne dass jedoch auf diese Eigenschaft abgehoben wurde.
- [19] O. Lilienthal: „Die Tragfähigkeit gewölbter Flächen beim praktischen Segelfluge“. In: Zeitschrift für Luftschiffahrt 1893, S. 261 f.
- [20] Popper, Josef: „Flugtechnische Studien: I. Ueber einige flugtechnische Grundfragen; anknüpfend an eine Besprechung des Buches: 'Die Luftwiderstandsgesetze, der Fall durch die Luft und der Vogelflug von Herrn Fr. R. v. Loessl, vorgetragen am 4. Februar und 3. März 1896 im Wiener flugtechnischen Verein“, in ZL 1896, S.193 ff, auch als Sonderdruck erschienen. Die Bemerkung bezieht sich auf ebene Flächen, die ausschließlich Gegenstand der erwähnten Untersuchungen waren.
- [21] Kiefer, Theodor: „Die nächsten Aufgaben der Flugtechnik“, in: „Illustrierte Aeronautische Mitteilungen“ 1902, S. 82–87, hier S. 84.
- [22] O. Lilienthal: „Der Vogelflug ...“. Kommentierte Neuauflage: B. Lukasch (Hrsg.), a. a. O., S. 70 ff und A. Dillmann, Artikel in diesem Heft.
- [23] Eine Übersicht über alle Flugzeugkonstruktionen Lilienthals bietet: S. Nitsch: „Die Flugzeuge von Otto Lilienthal. Technik, Dokumentation, Rekonstruktion. Otto-Lilienthal-Museum 2016.
- [24] Archiv des Deutschen Museums HS 6279, zitiert nach: Heinzerling/Trischler: „Otto Lilienthal. Flugpionier - Ingenieur – Unternehmer. Der vollständige zeichnerische und fotografische Nachlass.“ Gütersloh und München 1991, S. 227.
- [25] O. Lilienthal: „Der Flug der Vögel und des Menschen durch die Sonnenwärme“. In: Prometheus 1891, S. 35- 39.
- [26] Projekt SmartBird der Firma Festo, <https://www.festo.com/group/de/cms/10238.htm>.
- [27] W. Send: „Lilienthals Tafel VIII zum Schwingenflug: Vermächtnis und Ermutigung“. In: DGLR Luft- & Raumfahrt. Sonderausgabe Mai 2016, S. 20-23.
- [28] Gertrude Sugden Rogallo and Francis Melvin Rogallo: „Flexibile Kite“, US Patent Office 2,546,078, eingereicht am 23. November 1948.
- [29] Francis M. Rogallo: private Mitteilung 1993.
- [30] O. Lilienthal: „Der Vogelflug ...“. Kommentierte Neuauflage: B. Lukasch (Hrsg.), a. a. O.