Erweitere Fassung des gleichnamigen Artikels in der Sonderausgabe 2016 der Zeitschrift „Luft- und Raumfahrt“ zur 125. Wiederkehr der ersten Gleitflüge von Otto Lilienthal Im Jahr 1891.

Der Gollenberg bei Stölln - Stele zum Gedenken an Lilienthals Flugversuche. Unterhalb der Kuppe liegt der Absturzort seines letzten Flugs am 9. August 1896.

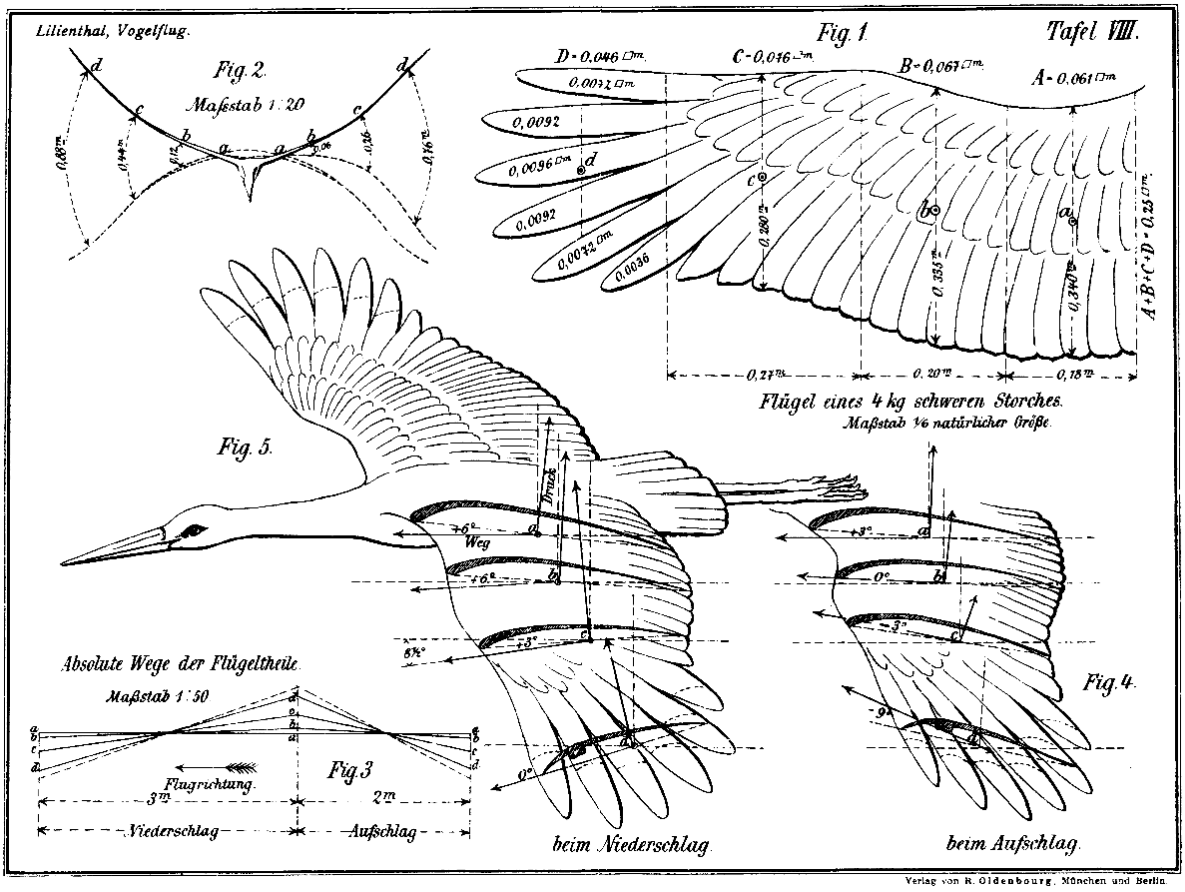
Tafel VIII im Anhang zu Otto Lilienthals Hauptwerk *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst* von 1889 zeigt in fünf Figuren alle Merkmale einer Storchenschwinge, die das Geschöpf in der Luft halten und ihm Bewegung verleihen. Mehr noch: die Tafel illustriert den Biegetorsionsantrieb schlechthin. Bei Aufschlag und Niederschlag wechselt fortlaufend die Durchbiegung der beiden Flügelflächen. Gekoppelt mit einer in der Zeit versetzten und ebenso stets wechselnden Verwindung (Torsion) wirkt die Bewegung als Schubmotor und zählt zu den größten Patenten der Natur. Sie dient Fischen im Wasser ebenso wie den fliegenden Lebewesen als Mittel der Fortbewegung. In Millionen von Jahren hat die Evolution den Mechanismus in so vielfältigen Spielarten zur Vollkommenheit getrieben, dass der einfache physikalische Kern erst lange nach Lilienthal in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts herausgearbeitet und sichtbar wurde[1]. Noch ohne diese Kenntnisse hat Lilienthal mit einer solchen fotografischen Genauigkeit beobachtet und gezeichnet, dass die geometrischen Abmessungen seiner fünf Figuren zusammen mit den kinematischen Angaben im Hauptteil seines Buches sich mühelos mit den theoretischen Befunden unserer Zeit in Einklang bringen lassen. Lilienthal war es nicht vergönnt, seine Beobachtungen zum Vortrieb der Lebewesen mit seinen schwingenden Flügeln wirkungsvoll umzusetzen. Mechanische und thermische Probleme an dem von ihm entwickelten Druckgasmotor mit komprimiertem Kohlendioxid ließen die Hoffnung auf eine Verlängerung seiner Gleitflüge mit zusätzlicher Schuberzeugung unerfüllt.

[1] Die Dissertation von Walter Birnbaum *Das ebene Problem des schlagenden Flügels* bei Ludwig Prandtl 1922 an der Universität Göttingen kann als der Beginn dieser Aufklärung gesehen werden.

©2016

Der physikalische Kern

Rückblickend auf den Stand der Kenntnisse zu Ende des 19. Jahrhunderts mag wundern, dass den Beobachtungen Otto Lilienthals und den Bildern der aufkommenden *Chronofotografie* von Étienne-Jules Marey nicht auch eine Deutung des Mechanismus der Schuberzeugung bei den fliegenden Lebewesen folgte. Dabei hatte Marey nicht nur die Technik der Schnellfotografie entwickelt und damit Vögel fotografiert, sondern auch mit Druckmessungen an fliegenden Tieren in einem Rundlauf genau die gleichen Bewegungen dokumentieren können, die Lilienthal beobachtet hatte. Der physikalische Kern der Schuberzeugung beruht auf einfachen Überlegungen, zu denen Lilienthal mit seinen Untersuchungen zum Auftrieb von ebenen und gewölbten Platten schon alles erforderliche Wissen gesammelt hatte. Eine Erklärung mag sein, dass selbst für den stationären Auftrieb einer gewölbten Platte erst 1902 mit einer Arbeit von Wilhelm Martin Kutta (und zeitgleich auch von Nikolai Jegorowitsch Schukowski) ein theoretischer Zugang gefunden wurde, der Widerstand sogar noch später erst durch Ludwig Prandtl die richtige Deutung fand. Das Ringen um die theoretische Beschreibung der stationären Größen Auftrieb und Widerstand hat dabei den vergleichsweise leichten Zugang zum Entstehen der dynamisch verursachten Schubkraft regelrecht verstellt.



Die einfache Erklärung setzt an bei der Tatsache, dass eine Tragfläche, die quer zur Anströmung nach oben gedrückt wird, eine entgegengesetzt zur Bewegung gerichtete Abtriebskraft erfährt. Fig. 2 in Tafel VIII zeigt diese Bewegung des Auf- und Niederschlags. Umkehrt ergibt sich beim Niederschlag eine Auftriebskraft. Wird nun der Flügel, wie in Fig. 4

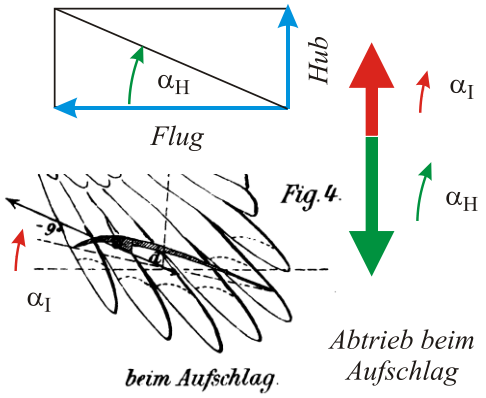
gezeichnet, beim Aufschlag zusätzlich in positive Richtung verdreht, so ergibt sich ein entsprechend dem Ausmaß der Drehung in Richtung des Flugs gerichteter Anteil dieser Querkraft, der als Schubkraft wirkt. Beim Abschlag in Fig. 5 verdreht das Tier den Flügel in negative Richtung, so dass die in Bahnrichtung weisende Komponente der Auftriebskraft ebenfalls eine in Flugrichtung weisende Schubkraft liefert. Über die Periode einer Schlagbewegung hinweg, die Fig. 3 im räumlichen Verlauf dargestellt, erzielt das fliegende Lebewesen also eine Schubkraft mit der doppelten Periode. Das fortlaufende Auf- und Abschlagen der Flügel bewirkt das Tier über die Leistung seiner Schlagmuskulatur. Die größte Querkraft und damit auch der größte Schub ergeben sich jeweils beim Passieren der Ruhelage des Flügels auf der Mitte zwischen oberem und unterem Umkehrpunkt.

Wie wir heute wissen, ist für die Verdrehung der Flügel im Vergleich zum Schlagen nur eine geringe Leistung erforderlich, die bei Vögeln von den Sehnen in den Flügeln übertragen wird. Lilienthal hat aber nicht nur die Kinematik der gekoppelten Biege- und Torsionsbewegung der Flügel genau beschrieben, sondern noch einen weiteren *Freiheitsgrad der Bewegung* beobachtet: das *Schwenken* der Flügel in Flugrichtung. Beim Aufschlag wird der Flügel entgegen der Bahnrichtung zurückgezogen, beim Abschlag nach vorne bewegt. Ein mitfliegender Beobachter sieht deshalb absolut im Raum einen kürzeren Weg der Flügelspitze beim Aufschlag und einen entsprechend längeren Weg beim Abschlag bzw. Niederschlag, wie dies in Fig. 3 dargestellt ist. Die theoretische Deutung dieses dritten Freiheitsgrades führt auf die Fähigkeit, mit dem Schwenken noch mehr Schubleistung aufbringen zu können. Zum Erzielen einer Schubkraft reicht aus physikalischer Sicht aber allein die gekoppelte Biege-torsionsbewegung aus.

Bedingung für das Entstehen einer Schubkraft

Ohne schon auf Zahlen eingehen zu müssen, kann das Verständnis für die Bedingungen, unter denen Schubkraft entsteht, noch etwas vertieft werden. Dazu legen wir zur besseren Orientierung zunächst ein Koordinatensystem (*x, y, z*) in den Rumpf des Tieres, dessen *x*-Achse parallel zur Flugrichtung von der Brust zum Schwanz und die *y*-Achse vom Rumpf zur rechten Flügelspitze weist. Die *z*-Achse senkrecht zu beiden zeigt nach oben. Nur der Vollständigkeit halber denken wir uns das Zentrum der Achsen im Schwerpunkt des Lebewesens verankert. Betrachten wir einen der Flügelschnitte *b, c* oder *d* in Fig. 2 beim Passieren der Ruhelage, so kann die entstehende Querkraft mit einem *scheinbaren Anstellwinkel* α_H aufgrund des Schlagens, auch Hubbewegung genannt, in Verbindung gebracht werden. Quergeschwindigkeit u_z und Längsgeschwindigkeit u_x, die eigentliche Fluggeschwindigkeit, bilden für jeden Flügelschnitt mit ihren Werten ein Rechteck, dessen Diagonale mit der Längsgeschwindigkeit diesen scheinbaren Anstellwinkel einschließt. Das Verhältnis u_z/u_x ist der Tangens von α_H, also für kleine Winkel dieser selbst in Bogenmaß. Dynamisch spielt dieser Winkel folglich die gleiche Rolle wie der instationäre geometrische Anstellwinkel α_I im jeweiligen Flügelschnitt als Folge der Torsion, nur dass die beiden Winkel eine gegensätzliche Wirkung hervorrufen. Der geometrische Anstellwinkel α_I bewirkt beim Aufschlag eine Auftriebskraft, der scheinbare Anstellwinkel α_H eine Abtriebskraft. Die Differenz der beiden Winkel kann als *effektiver*

Anstellwinkel des Flügelschnitts bezeichnet werden. Physikalische Leistung als Produkt aus Kraft × Geschwindigkeit wird definitionsgemäß aufgebracht, wenn die Richtung der Kraft mit der Richtung der Geschwindigkeit übereinstimmt. Da Auftrieb und Widerstand die Komponenten der Reaktionskraft der umgebenden Luft sind, zeigt der Kraftvektor des arbeitenden Flügels in die Gegenrichtung. Beim Aufschlag bringt die Brustmuskulatur des Tieres eine Kraft in die gleiche Richtung auf, in die sich der Flügel bewegt. Dies bedeutet, dass die Reaktionskraft der Luft abwärts zeigen muss, also der effektive Anstellwinkel $\alpha_H + \alpha_I < 0$ ist.



- Betragsmäßig ist beim Schwingenflug der scheinbare Anstellwinkel infolge der Biegung des Flügels stets größer, oft sogar sehr viel größer, als der instationäre geometrische Winkel infolge der Torsion: $|\alpha_H| \gg |\alpha_I|$.

Deswegen sieht man gerade bei großen Vögeln wie bei einem Storch das Verdrehen des Flügels nur, wenn man wirklich scharf beobachtet. Von Lilienthal ist diese zentrale Bedingung für das Entstehen der Schubkraft in unübertroffener Weise und auch das erste Mal mit seiner Tafel VIII dokumentiert worden.

Die naheliegende Frage, was denn im umgekehrten Fall passiert, liegt außerhalb des Blickwinkels dieses Artikels. Aber sie beantwortet sich gewissermaßen von selbst. In diesem Fall wird Leistung aus dem Luftstrom entnommen, der dazu aber erst einmal in Form von Wind vorhanden sein muss. Tatsächlich gibt es Arbeitsmaschinen, die diesen spiegelbildlichen Mechanismus ausnutzen. Als parasitären Effekt kennen ihn alle Flugzeugkonstrukteure. Denn das technisch bedeutsame und höchst gefährliche *Flattern* von Tragflächen beruht auf dieser Entnahme von Leistung aus einem Luftstrom bei einer zum Beispiel durch eine Böe angestoßenen Biegetorsionsbewegung der Flügel.

„Berechnung der Flugarbeit“

Diese Überschrift trägt Kapitel 40 in Lilienthals Buch. Es ist das wichtigste Kapitel im Hinblick auf Lilienthals Vermächtnis, den Schwingenflug der Lebewesen der wissenschaftlichen Untersuchung erschlossen zu haben. Am Ende des Kapitels kommt Lilienthal zu zwei Ergebnissen.

> *Da nicht anzunehmen ist, daß durch Vergrößerung der Flügel bessere Verhältnisse sich erzielen lassen, so dürfen wir hiermit den Satz aussprechen, daß der Mensch unter den günstigsten Bewegungsformen bei Anwendung des Ruderfluges in*

> *Windstille wenigstens 0,36 HP zum Fliegen gebraucht und daher mit Hülfe seiner eigenen Muskelkraft nicht dauernd zu einem solchen Fluge befähigt ist.*
>
> *Um diesem Fluge bei Windstille eine praktische Bedeutung zu verschaffen, müßten wir bestrebt sein, leichte Motore zur Verwendung zu bringen.* (S. 176, Mitte)

Umgerechnet bedeuten 0.36 HP eine Leistung von knapp 270 Watt. Lilienthal bringt dann seine Überlegungen ein, dass größerer Wind diesen Kraftaufwand reduziert. Bei zehn Metern pro Sekunde ist gar keine Leistung mehr zum Fliegen erforderlich. Er notiert am Ende des Kapitels seine optimistische Bewertung:

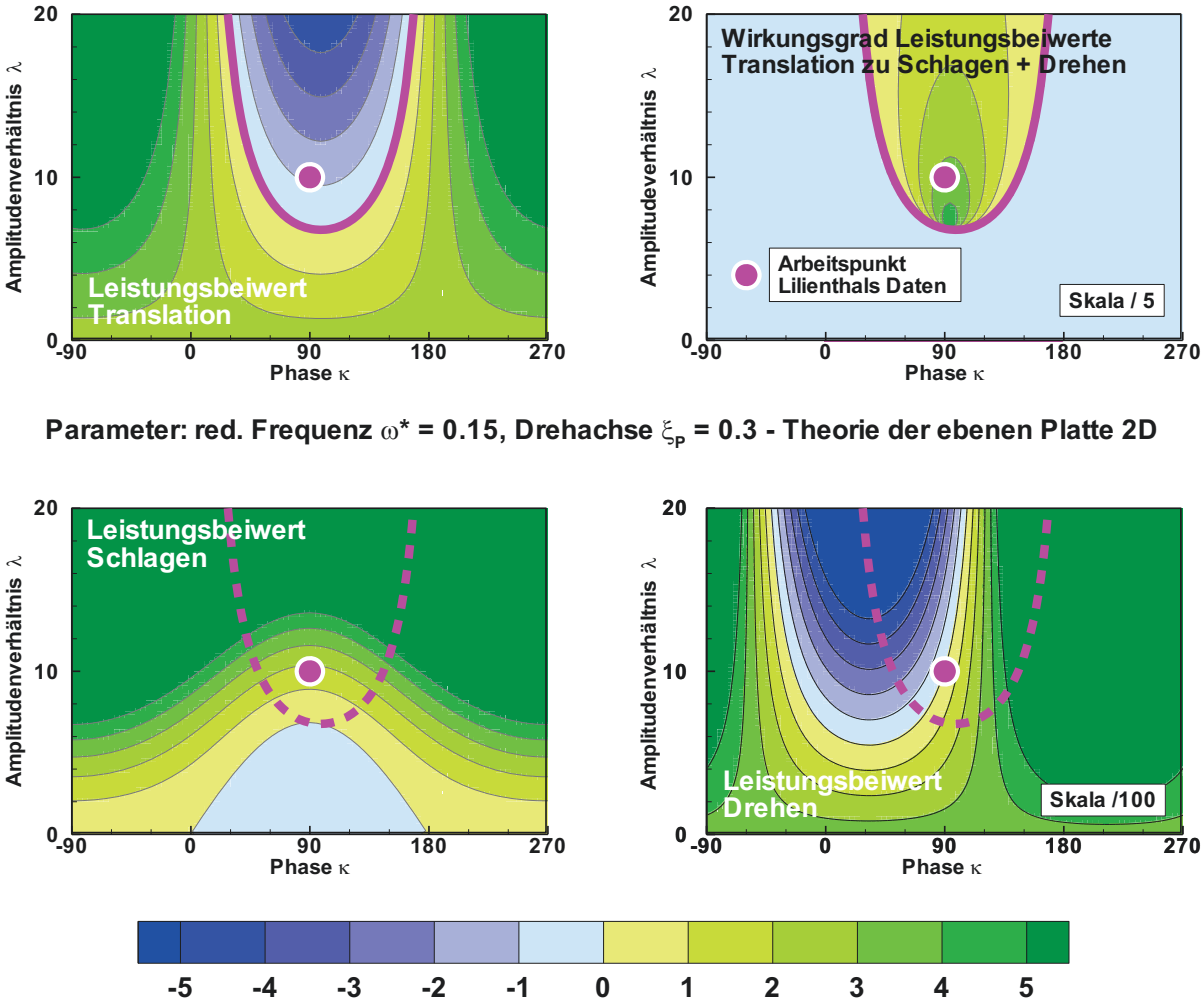
> *Man sieht, daß für Winde zwischen 6 und 9 m Geschwindigkeit, die man nur mit „frische Brise" zu bezeichnen pflegt, so geringe Arbeitswerte sich ergeben, daß selbst dann, wenn einige Verhältnisse viel ungünstiger als angenommen eintreten würden, noch eine so geringe Leistung übrigbleibt, daß der Mensch durch seine physische Kraft sehr wohl imstande sein müßte, einen geeigneten Flugapparat wirkungsvoll in Thätigkeit zu setzen.* (S. 177, Mitte)

Aus Lilienthals Ergebnissen wird deutlich, dass er den Ruderflug, also den Schwingenflug, nur als eine Ergänzung zum Segelflug versteht, so dass bei hinreichender Geschwindigkeit des Windes keine Leistung mehr zur Vorwärtsbewegung benötigt wird. Dies ist bestenfalls ein Missverständnis der Erfordernisse, denn je größer der Gegenwind ist, desto mehr Leistung ist erforderlich für die gleiche Geschwindigkeit über Grund. Das ist anders als beim Segeln auf dem Wasser, wo man sich ohne eigene Leistung auch entgegen dem Wind bewegen kann. Das Segel stützt sich über den Bootskörper, oft verstärkt mit einem Schwert, im Wasser ab, das als Widerlager die Gegenkraft aufnimmt. Auch Lilienthals Abschätzung des Leistungsbedarfs von 270 Watt bei Windstille ist noch weniger als die Hälfte dessen, was an Leistung für den menschlichen Schwingenflug nach heutigen Erkenntnissen aufgebracht werden muss. Der Verfasser hat diesen Bedarf in einer Arbeit von 2003 auf rund 600 Watt abgeschätzt[2]. 2010 hat der Student Todd Reichert von der University of Toronto mit dem Fluggerät *Snowbird* den ersten sehr gut dokumentierten Horizontalflug mit aktivem Schwingenflug über knapp 20 Sekunden geschafft[3]. Die von ihm dabei abgegebene mechanische Leistung wurde zu 620 Watt ermittelt. Daraus wird deutlich, dass es für den Menschen nur unter größter Anstrengung überhaupt möglich ist, allein mit seiner Muskelkraft zu fliegen wie ein Vogel.

Lilienthals eigentliche Leistung im Hinblick auf den Schwingenflug liegt daher in seiner systematischen Vorgehensweise und der Dokumentation seiner Ergebnisse, nicht zuletzt der fotografischen Dokumentation. Seine Gleitflüge nach Erscheinen seines Buches sind zum Fundament der Entwicklung der Luftfahrzeuge geworden. Die Fotos von seinen Flügen machten ihn in den U.S.A. bekannter als in Deutschland. Seine Bedeutung für die Gebrüder Wilbur und Orville Wright gilt als außerordentlich groß. Ebenso haben Lilienthals Gleiter den

[2] Send W. *Der Traum vom Fliegen*, Naturwissenschaftliche Rundschau 56, Heft 2, 65-73, 2003.
[3] Mehr dazu unter www.ornithopter.net

Pionier des ersten Motorflugs, Gustave Whitehead, bei seinen Konstruktionen ganz wesentlich beeinflusst.



Parameter: red. Frequenz ω^* = 0.15, Drehachse ξ_P = 0.3 - Theorie der ebenen Platte 2D

Lilienthal beschreibt an früherer Stelle, welche Faktoren – neben den gemessenen geometrischen Daten - in seine Rechnung eingehen.

. . . und zwar:

1. *Die Fluggeschwindigkeit.*
2. *Die Zahl der Flügelschläge pro Sekunde.*
3. *Die Zeiteinteilung für Auf- und Niederschlag.*
4. *Die Größe des Flügelausschlages.*
5. *Die Neigung der einzelnen Flügelprofile gegen die zugehörigen absoluten Wege.* (S. 164)

Mehr wird auch bis heute nicht benötigt, um Lilienthals Beobachtungen in eine moderne Darstellung der Leistungsverhältnisse beim Schwingenflug einzubetten.

Lilienthals Beobachtungen zum Schwingenflug

Lilienthal schätzt die Fluggeschwindigkeit seiner Störche auf 10 - 12 m/s bei einer Schlagfrequenz von 2 Hz. Für den Flügelschnitt *c* mit der Flügeltiefe 0.28 m ist auch der Winkel der Drehung mit 8.5° angegeben. Die zugehörige Schlagamplitude ergibt sich aus der Hälfte des Hubs von 0.44 m. Die Phasenbeziehung zwischen dem Schlag und der Drehung ist in dem Sinne 90°, dass die Drehung maximale Werte erreicht, wenn der Flügel gerade durch Ruhelage geht. Dreht der Flügel in diesem Schnitt *c* um einen Drehpunkt, der 0.3 Flügeltiefen hinter der Vorderkante liegt, dann ergibt sich aus der Theorie der ebenen schwingenden Tragfläche ohne Dicke, wie sie 1936 von Hans-Georg Küssner und anderen Forschern entwickelt worden ist, dass der Storch für die Drehung seiner Flügel so gut wie keine Leistung benötigt. Zu den genannten Daten sind die Diagramme der über eine Schlagperiode gemittelten Leistungsbeiwerte berechnet und darin der zugehörige Arbeitspunkt eingetragen worden.

Die Diagramme zeigen die Werte als Konturflächen[4]. Auf der horizontalen Achse ist die schon erwähnte Phasenlage κ aufgetragen, auf der vertikalen Achse das so genannte Amplitudenverhältnis λ. Letzteres gibt die Auslenkung des Schlages an, bezogen auf die jeweilige Flügeltiefe, im Verhältnis zur maximalen Verdrehung. Je größer λ wird, desto geringer ist der Anteil der Drehung an der Bewegung. In den blauen Bereichen wird Leistung entnommen, in den grünen Bereichen Leistung aufgebracht. Berücksichtigt sind nur die Freiheitsgrade Translation, also die Richtung der Schubleistung, sowie Schlagen und Drehen. Würde man auch das Schwenken noch einbeziehen, so ergäbe sich eine höchst differenzierte Analyse des Tierflugs allgemein[5]. Der Wirkungsgrad zeigt an, welcher Anteil der beim Schlagen und Drehen aufgebrachten Leistungen in Schubleistung umgesetzt wird.

Auch wenn Lilienthal noch das Instrumentarium der theoretischen Deutung seiner Beobachtungen fehlte, so hat er doch den Weg aufgezeigt, wie das Geheimnis der fliegenden Lebewesen entschlüsselt werden kann. Bis heute hat es erst wenige Versuche gegeben, alle theoretischen Erkenntnisse zu bündeln. 2011 wurde der künstliche Vogel *SmartBird* der Öffentlichkeit vorgestellt. Ein kleines Team, dem auch der Verfasser angehörte, konnte beim Bau des Fluggeräts erstmals viele Erkenntnisse praktisch umsetzen und damit eine große Öffentlichkeit für das Potenzial des Biegetorsionsantriebes interessieren. Ob dies in der Zukunft zu einer technischen Nutzung dieses vielseitigen und effizienten Antriebs in der Luftfahrt führen wird, ist offen. Aber Lilienthals Arbeiten sind nicht nur ein kostbares Vermächtnis, sondern auch Ermutigung, diesen Weg weiter zu beschreiten. ■

Quellennachweis: Titelfoto und Grafiken stammen vom Verfasser. Lilienthals Tafel VIII ist der Originalfassung der 2. Auflage von 1910 entnommen, R. Oldenbourg Verlag München und Berlin.
Verweis dieses Artikels: www.dglr.de/lur2016/Lilienthal_Schwingenflug

[4] Weitere Erläuterungen zur Darstellung finden sich in der Arbeit unter Fußnote 2 und unter www.aniprop.de/artikel.
[5] Send W. *Physik des Fliegens*, Physikalische Blätter 6/2001, S. 51-58 (seit 2002 Physik Journal).