

Über die Flugeigenschaften von Otto Lilienthals Großem Doppeldecker

Markus Raffel,¹ Felix Wienke,² and Andreas Dillmann³

*Institut Für Aerodynamik und Strömungstechnik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Göttingen*

Der Artikel beschreibt aerodynamische Messungen, die die strukturelle und die statische Längsstabilität eines authentischen Nachbaus von Otto Lilienthals großem Doppeldecker nachweisen. Darüber hinaus wurde der nach Patentzeichnungen, Fotos und Textbeschreibungen vom Otto-Lilienthal-Museum gebaute Nachbau des historischen Gleiters mit einer Seilwinde geschleppt und schließlich, ganz ohne Seile, bergab geflogen. Die Tests ermöglichen die Beurteilung der Steuerbarkeit und Stabilität des Flugzeugs nicht nur im stationären Flug, sondern auch bei Start, Landung und bei Windböen. Eine kurze Beschreibung der Konstruktionsparameter und der angewandten Methoden wird ebenso beschrieben wie die Auswertungen Kraft- und Momentdaten, die aus Waagenmessungen gewonnen wurden. Dargestellt wird darüber hinaus die Auswertung eines begrenzten Satzes von Daten, die während des Fluges gewonnen wurden, einschließlich Geschwindigkeit, Dauer und geflogene Distanzen.

Nomenklatur

A_f	= Flughöhe ($A_f = 0 \triangleq$ gerade Beine, Füße am Boden)
α	= Anstellwinkel des Flugzeugs
C_D	= Widerstandsbeiwert
C_L	= Auftriebsbeiwert
C_M	= Momentenbeiwert entlang der Flugzeuglängssachse
C_P	= Druckbeiwert
c	= Flügeltiefe
E	= Gleitzahl C_L/C_D
η	= negative geometrischer Einstellwinkel des Höhenleitwerkes
Q	= Winkelgeschwindigkeit der Flugzeug-Nickbewegung
q_∞	= Dynamischer Druck
ρ	= Luftdichte
Δs	= Flugstrecke
U_∞	= Anströmgeschwindigkeit
v_f	= Fluggeschwindigkeit

¹ Abteilungsleiter, Hubschraubaerodynamik

² Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Abteilung Hubschraubaerodynamik

³ Direktor, DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik

I. Einführung

Der Flugpionier Otto Lilienthal war der erste Mensch, der vor mehr als 125 Jahren mehrere Flugzeuge erfand, baute und öffentlich flog. Im Jahr 1893 erhielt er ein Patent für seinen Eindecker [1]. Dieser "Normalsegelapparat" wurde 1895 mehrfach verkauft, sowohl in Amerika als auch in Europa. Im selben Jahr entwickelte er zwei verschiedene Doppeldecker, von denen der "Große Doppeldecker" derjenige war, den er am erfolgreichsten flog. Ziel der Entwicklung des Doppeldeckers war es, die Flügelfläche des Eindeckers zu vergrößern, ohne die Spannweite zu vergrößern, da dies die Steuerung des Flugzeugs im Rollbetrieb erschwert hätte. Unzählige Flüge mit beiden Doppeldeckern wurden fotografisch dokumentiert. Diese beiden Segelflugzeuge sind die ersten erfolgreichen mantragenden Doppeldecker der Geschichte. Lilienthals Flugvorführungen und seine Theorie der gewölbten Flügel, die in seinem Buch [2] entwickelt und veröffentlicht wurde, trugen zu der epochalen Wende in der rasanten Entwicklung der Luftfahrt bei. Octave Chanute und andere führende Experten korrespondierten mit Lilienthal. Samuel P. Langley besuchte Lilienthal in Berlin und verfolgte seine Flüge mit Ein- und Doppeldeckern und schickte Berichte an seinen Mitarbeiter Augustus Herring. Chanute, Autor des anderen einflussreichen Buches der damaligen Zeit [3] und später ein Freund der Gebrüder Wright, folgte Lilienthals Ansatz, Flugversuche sorgfältig zu planen und schrittweise durchzuführen, und führte damit mehrere jüngere Männer, wie Augustus Herring, zu erfolgreichen Flugvorführungen im Jahr 1896 und darüber hinaus. Die Gebrüder Wright führten in den Jahren 1900-1902 umfangreiche Segelflugversuche durch, bevor sie Ende 1903 ihre ersten Motorflüge durchführten. Es war dieses schrittweise Vorgehen, das von Lilienthal angewandt und beworben wurde, dass die "Airmen" so viel erfolgreicher machte als die "Chauffeure", die versuchten, motorisierte Maschinen zu fliegen, ohne zuvor ihre Fähigkeiten als Piloten ausreichend trainiert zu haben. Die Wrights übernahmen die Grundkonstruktion des Chanute-Herring-Segelflugzeugs, das bei den Experimenten 1896 in der Nähe von Chicago sehr gut geflogen war. Dieser Doppeldecker flog so stabil wie Lilienthals Doppeldecker [4], nutzte aber zusätzlich den Vorteil einer aus dem Brückenbau bekannten, mit Strebendraht verstärkten Fachwerkstruktur, die eine Verlängerung der Spannweite ermöglicht. Diese strukturelle Verbesserung zeigt deutlich das besondere ingenieurwissenschaftliche Verständnis von Octave Chanute und seine Erfahrungen als führende Autorität im Brückenbau. Die Gebrüder Wright nutzten frühere Entdeckungen, indem sie sowohl Chanutes Rahmenstruktur als auch die 1889 von Lilienthal veröffentlichten aerodynamischen Daten über Auftrieb und Widerstand gewölbter Flügel auf ihre Flugzeuge anwandten. Sie erweiterten dieses Wissen und untersuchten später zusätzlich die positive Wirkung einer erhöhten Flügelstreckung in ihrem Windkanal. Darüber hinaus waren die Gebrüder Wright die ersten, die das Problem des negativen Wendemomentes durch ihre kombinierte Betätigung von Flügelverwindung und Ruder effizient lösten.

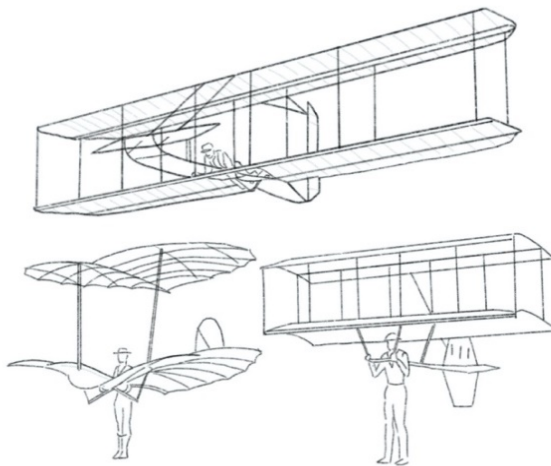


Fig.1 1902 Wright Gleiter (oben) und seine Vorgänger: 1895 Lilienthals Großer Doppeldecker (links) und 1896/97 der Chanute-Herring Gleiter (rechts)

II. Gleiter Rekonstruktion und Abmessungen

DLR-Windkanalversuche haben anhand von Messungen an Lilienthals Normalsegelapparat den Einfluss der Durchlässigkeit des Gewebes gezeigt, das ebenso wie das des hier beschriebenen Nachbaus auf einem historischen Webstuhl gewebt worden war [5]. Die Ergebnisse dieser Versuche, sowie die Analysen einer Stoffprobe eines Originalleiters, wurden beim Bau des Großen Doppeldeckers bis ins Detail berücksichtigt. Das Unterdeck des Großen Doppeldeckers hat die gleiche Größe wie dasjenige, das in Lilienthals patentiertem Eindecker verwendet wird. Im Gegensatz zum Unterdeck ist das Oberdeck aber nicht faltbar, sondern in der Mitte geteilt. Neben der Erhöhung des Auftriebs verändert das Oberdeck auch die flugmechanischen Eigenschaften im Vergleich zum Eindecker, was in der Zusammenfassung noch genauer beschrieben wird. Der ursprüngliche Große Doppeldecker hat nicht überlebt. Es gibt jedoch mehrere erhaltene Exemplare des ursprünglichen Eindeckers, auf dem der Doppeldecker basierte. Der authentische Nachbau des großen Doppeldeckers, der für die hier beschriebenen Tests verwendet wurde, wurde vom Otto-Lilienthal-Museum in Anklam (Deutschland) hergestellt. Es wird berichtet, dass Lilienthal seine Segelflugzeuge während seiner Versuche in gewissem Umfang modifiziert hat [6]. In Verbindung mit der durch Stahldrähte verstärkten Holz- und Gewebekonstruktion ist davon auszugehen, dass die Segelflugzeuggeometrien einer gewissen Variation unterworfen waren. Die Geometrie des Nachbaus basiert sowohl auf überlieferten Zeichnungen Lilienthals [1] als auch auf Zeichnungen von Nitsch [6]. Kreisbogenprofile wurden mit einem Dicken-zu-Sehnen-Verhältnis von 1/20 hergestellt, was den von Lilienthal [7, S. 271] angegebenen Wölbungsverhältnissen entspricht. Besonderes Augenmerk wurde auf die Spannung der Stahldrähte gelegt, die die Weidenlängsträger der Flügel mit dem Hauptrahmen verbinden. Ihre Längen haben großen Einfluss auf die Gesamttrimmung des Flugzeugs. Bei allen Waagen-Messungen und späteren Flugversuchen wurde das Flügelgewebe mit einer verdünnten Holzleimbeschichtung versiegelt. Diese Behandlung führte zu einer flexiblen Beschichtung, die aerodynamisch identisch mit der von Lilienthal verwendeten Kollodiumbeschichtung war und gleichzeitig leichter aufzutragen ist. Dies ist ein chemischer Unterschied, aber aerodynamisch von geringer oder gar keiner Bedeutung [5].

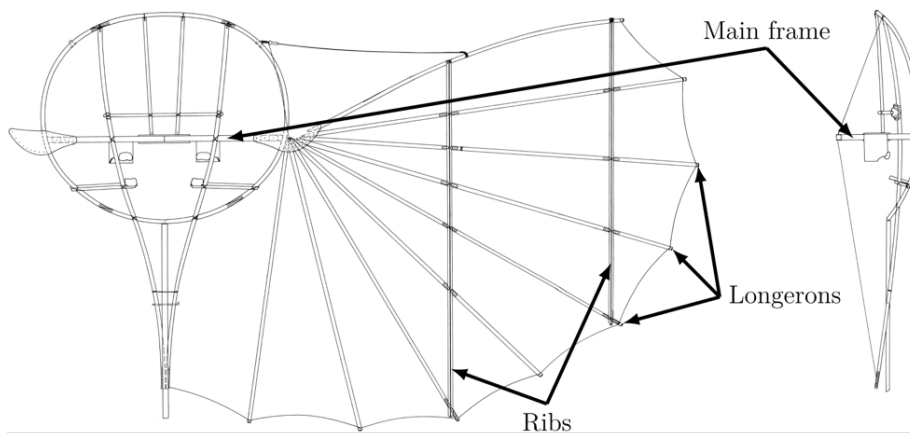


Fig. 2 Aufbau des Rahmens und der Flügel des unteren Decks.

Es gibt noch drei weitere kleine Unterschiede zwischen dem Nachbau des Großen Doppeldeckers und Lilienthals Original. An den unteren Enden des Hauptrahmens wurden beim Nachbau Kufen angebracht. Sie waren - wie die Kniepolster des Testpiloten - nur bei Pannen bei der Landung im Einsatz, hatten aber während der Flüge keinen Einfluss. Anstelle von massiven Stahldrähten und Spannschlössern (von Lilienthal selbst patentiert) wurden Edelstahl Drahtseile von 2 mm Durchmesser und ovale Druckhülsen verwendet, wie das heute z. B. bei Hängegleitern üblich ist. Zwei parallele, kurze Bambusstäbe wurden auf beiden Seiten des Cockpits angebracht, um zu verhindern, dass sich der Pilot zu weit zurücklehnt. Sie ersetzen die von Lilienthal verwendeten Rückenlehnen und sind - wie der Helm - ein weiteres Zugeständnis an modernere Sicherheitsabwägungen. Glücklicherweise wurden bei den hier berichteten Flügen weder der Helm noch die Bambusstäbe benötigt. Die Armlehnen des

Nachbaus wurden im Vergleich zum Original primitiver gestaltet. Der Pilot konnte sich auf sie stützen, wie Lilienthal auf seine, aber er konnte sie nicht benutzen, um den hinteren Teil des Flugzeugs anzuheben. Bei den freien Flügen am Hang war das Anheben des Flugzeug Hecks mit den Armen unnötig, da der Gegenwind das gesamte Flugzeug gleich nach den ersten Metern anhub. Bei schwachem Wind während einiger Windenflüge manchmal Schultergurte verwendet, um das Heck des Flugzeugs vor dem Start anzuheben und so die Anfangsbeschleunigung zu erleichtern. Weidenholz wurde für die Teile verwendet, die stark verbogen werden mussten, wie z.B. der Cockpitrahmen und Höhen- und Seitenruder. Allerdings wurden für die ersten drei Längsholme an der Vorderkante der Flügel nicht aus Weidenruten, sondern aus Kieferstäben gefertigt, die nach dreitägigem Einweichen in Wasser in Form gebogen worden waren. Dadurch erhöhte sich das Gewicht des Flugzeugs auf 33,5 kg. Es war erforderlich, weil einer der Testpiloten etwa 15% schwerer war als Lilienthal. Außerdem sind die erforderlichen Auftriebskräfte beim horizontalen Fliegen am Seil noch einmal ca. 15% höher als beim hangabwärts gerichteten Flug. Wie bei Lilienthals Originalflugzeugen wurde Bambus nur dort verwendet, wo Teile steif und gerade sein mussten, wie z. B. der Leitwerksträger und die beiden aufrechten Pfosten, die den Oberflügel abstützen.

Table 1 Maße der Doppeldecker Replika

Länge	5.25 m
Spannweite	6.60 m
Flügelfläche	24 m ²
Leergewicht	33.5 kg
Flügelteufe	2.03 m

III.

IV. Waagemessungen

Die umfangreichen Waagentests des Großen Doppeldeckers wurden auf dem Testfahrzeug des Deutschen Hängegleiterverbandes (DHV) in Fürstfeldbruck durchgeführt. Die verwendete Dreikomponenten-Waage befindet sich am oberen Ende der Tragstruktur auf dem Fahrzeug und war an dem Hauptrahmen des Gleiters geklemmt, um Daten bei Anstellwinkeln zwischen $-17^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ und Geschwindigkeiten von $20 \text{ (km/h)} \leq U_\infty \leq 45 \text{ (km/h)}$ aufzuzeichnen. Der Einfluss des Luftwiderstandes des Piloten wurde durch einen Zuschlag auf der Grundlage früherer Tests abgeschätzt. Der negative Anstellwinkel Höhenruders wurde auf die mittlere Position $\eta_2 = -22,5^\circ$ der drei in Abbildung 4e dargestellten kalibrierten Winkel eingestellt. Alle Daten wurden während der Messfahrten auf der 2,7 km langen Start- und Landebahn aufgezeichnet. Kontinuierliche Anstellwinkelreihen wurden mit einer niedrigen Winkelgeschwindigkeit durchgeführt, um quasistationäre Daten zu erhalten. Das Versuchsfahrzeug zeichnet während der Testfahrten die Geschwindigkeit und Richtung der freien Strömung auf, um die aktuellen atmosphärischen Bedingungen zu berücksichtigen. Die Ergebnisse wurden in diskrete Anstellwinkelintervalle sortiert und gemittelt. Der Einfluss von atmosphärischen Störungen wurde weiter minimiert, indem die Testläufe in beiden Pistenrichtungen für jede Geschwindigkeit wiederholt wurden. Während der Versuche zeigte das Fluggerät Strukturschwingungen, die sich in den quasistationären Messkurven als Rauschen manifestierten. Da die Waagenaufnahme vergleichsweise steif ist, stammte der Großteil dieser elastischen Verformungen aus der Struktur des Flugzeugs. Die Flügelstruktur aus Holz- und Stahlversteifungsdrähten erwies sich als eine gut konstruierte Fachwerkstruktur, die kleine und kontinuierliche Verformungen in Form von Flügelverbiegungen aufwies. Die Leitwerkstruktur war mit dem Hauptrahmen durch einen einzelnen Bambusstab von etwa 30 mm verbunden und mit Baumwollschnüren gegen die Hauptstruktur verspannt. Dies führte zu einer vertikalen Auf- und Abwärtsbiegung und einer Längsverdrehung der gesamten Höhenleitwerksstruktur während der Tests. Die Schwingungen des Höhenleitwerks waren am stärksten bei hohen Anstellwinkeln, wo sie durch Turbulenzen im Nachlauf des Flügels angeregt wurden. Änderungen des Anstellwinkels des Höhenleitwerks aufgrund der Verformung der Leitwerksstruktur unter der aerodynamischen Belastung wurden nicht gemessen. Der von Savitzky und Golay [8] beschriebene digitale Filter wurde auf die gemittelten Kräfte und Momente angewendet, um die durch Messrauschen und Vibrationen verursachten kleinräumigen Schwankungen zu reduzieren.



Fig. 3 Kraft- und Momentenmessungen am Großen Doppeldecker auf dem Testwagen des Deutschen Hängegleiterverbandes (DHV).

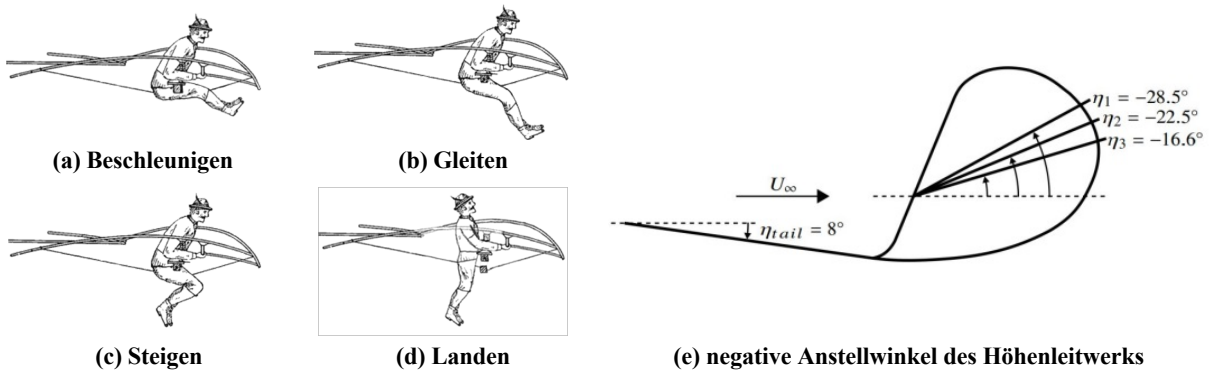


Fig. 4 Pilotenhaltung und Anstellwinkel des Höhenleitwerks.

Die gemessenen Auftriebskoeffizienten sind in Abbildung 5 über den Anstellwinkel bei verschiedenen Freistrahlggeschwindigkeiten dargestellt. Bis zu einem Anstellwinkel von $\alpha = 12^\circ$ weisen alle Auftriebskurven ein lineares Intervall mit Unterschieden in der Größenordnung von $\Delta C_L = 0,12$ zwischen der höchsten und der niedrigsten Freistrahlggeschwindigkeit auf. Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt der Auftrieb bei einem gegebenen Anstellwinkel tendenziell zu. Das Überziehverhalten ist gutartig mit einer allmählichen Abweichung von der Auftriebskurve und geringen Steigungen in der Nähe des maximalen Auftriebskoeffizienten zwischen $(1,10 \leq C_L \leq 1,25$ bei einem Anstellwinkel von etwa $\alpha \approx 20^\circ$. Der in Abbildung 5 gezeigte Auftrieb über die Widerstandspolare hat eine klassische parabolische Form im linearen Auftriebsintervall unterhalb von $C_L = 1,1$. Der minimale Luftwiderstand von $0,123 \leq C_{Dmin} \leq 0,155$ tritt in der Nähe von $C_L \approx 0,25$ auf. Eine Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit führt zu einer Verringerung des Minimalwiderstands.

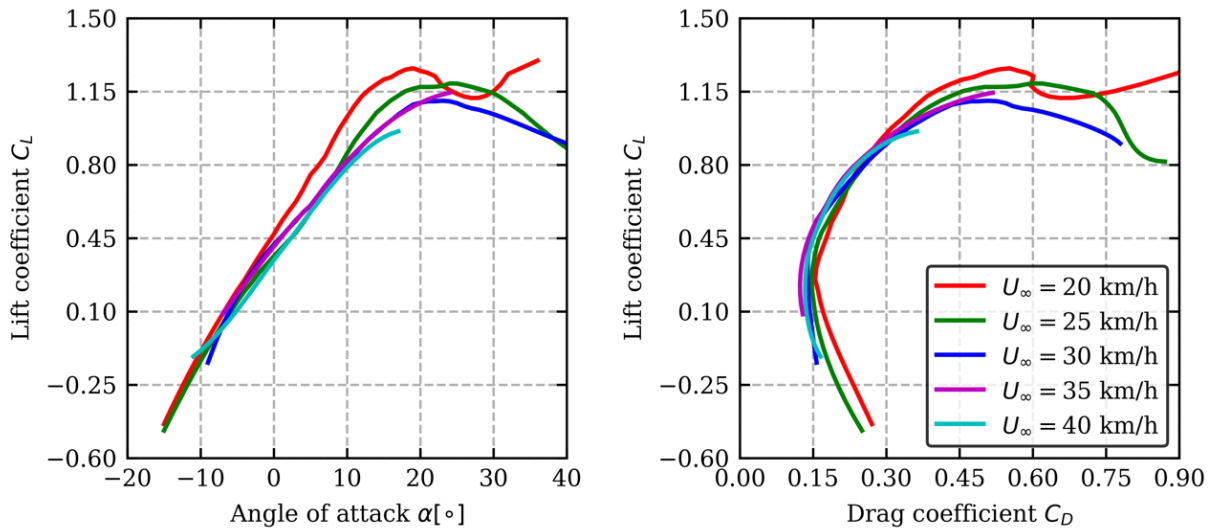


Fig. 5 Auftriebsbeiwert aufgetragen über dem Anstellwinkel (links) und Widerstandsbeiwert (rechts) bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten.

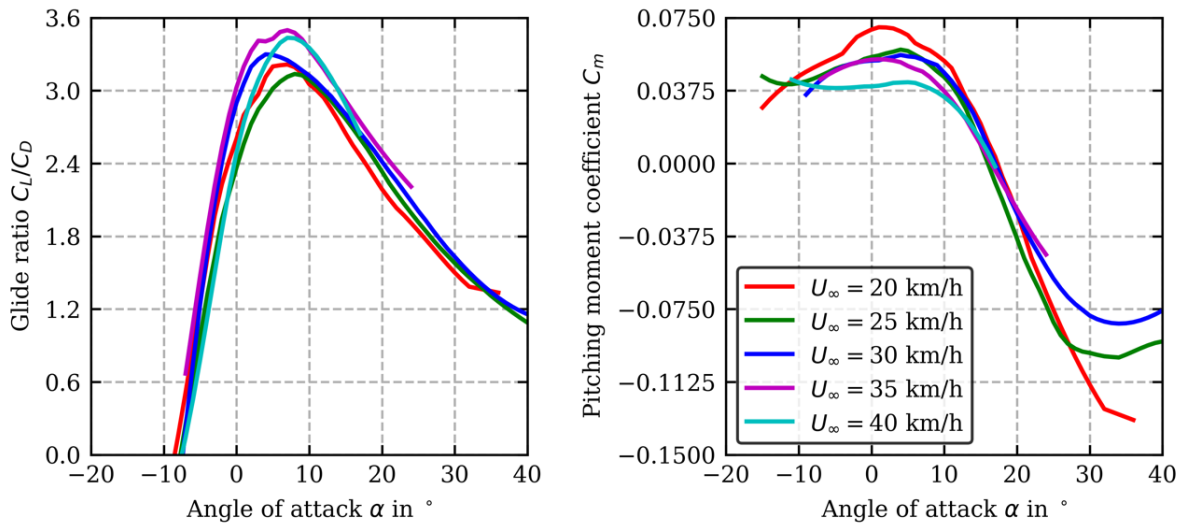


Fig. 6 Gleitzahl (links) und Nickmomentenbeiwert (rechts) für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten.

Die Nickmomente um die Mitte des Hauptrahmens des Flugzeugs sind auf der rechten Seite von Abbildung 6 dargestellt. Sie weisen drei verschiedene Intervalle auf. Das erste Intervall bis zu einem Anstellwinkel von $\alpha = 10^\circ$ fällt mit dem linearen Auftriebsintervall zusammen. Alle Freistrahlgeschwindigkeiten zeigen positive, aufsteigende Nickmomente um $C_M = 0,055$ mit einer Tendenz zu kleineren Werten mit zunehmender Geschwindigkeit. Die Änderung des Nickmoments im linearen Intervall ist zu klein, um eine lineare Abhängigkeit vom Anstellwinkel aufgrund der Messunsicherheit zu bestätigen. Zwischen $10^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$ löst die Strömung ab und führt zu einer linearen Abnahme des Nickmoments bei geringen Unterschieden zwischen den verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten. Oberhalb von $\alpha = 25^\circ$ ist der Gleiter im voll überzogenen Flugzustand und das Nickmoment verringert sich. Kleinere Anströmgeschwindigkeiten führen zu negativen Nickmomenten. Die

Gleitzahl $E = C_L/C_D$ ist auf der linken Seite von Bild 6 dargestellt. Der Doppeldecker erreicht eine maximale Gleitzahl von $E = 3,5$ bei einer Anströmgeschwindigkeit von $U_\infty = 35$ (km/h). Die niedrigste Gleitzahl von $E = 3,1$ wurde bei einer Anströmgeschwindigkeit von $U_\infty = 25$ (km/h) gemessen.

V. Erlernen der Rollsteuerung – Flüge an der Seilwinde

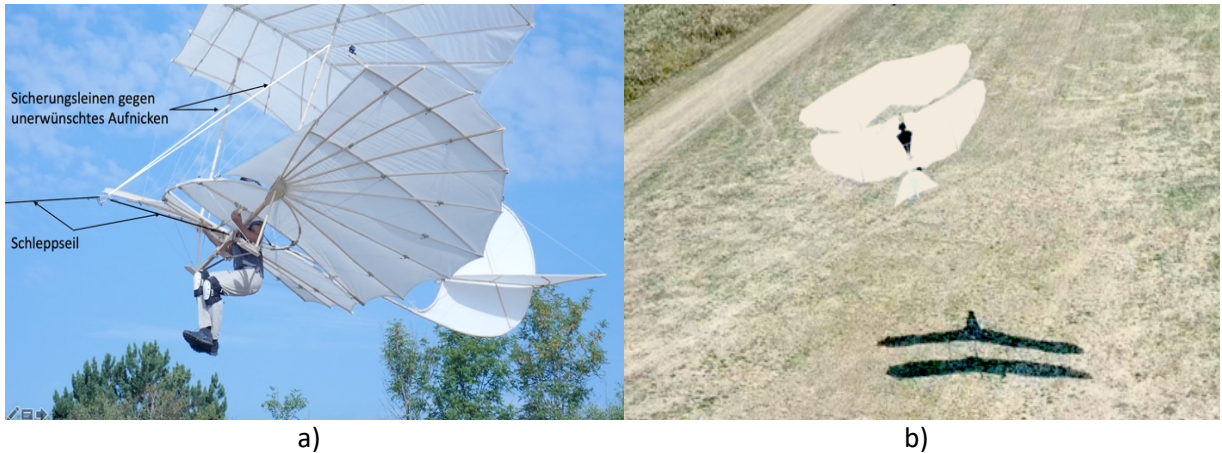


Fig. 7 Erlernen der Rollsteuerung mit durch die vorgelagerte Schleppseilanbindung im wesentlich vorbestimmten Anstellwinkel (a) und Abwenden einer unerwünschten Lagesänderung (b).

Die Fähigkeiten des Piloten unerwünschte Rollbewegungen abzufangen, die durch Böen oder beim Strömungsabriss zu asymmetrischem Auftrieb führen können, besonders wichtig. Die erforderlichen Maßnahmen gegen unbeabsichtigtes Rollen (seitliche Gewichtsverlagerung in Richtung des steigenden Flügels) sind auch in den jährlichen Flugberichten von Otto Lilienthal [9] gut beschrieben.

Table 2 Windenflüge – August 2018

Flugstrecke Δs	119m – 380m
Flughöhe A_f	-0.1m – 3.8m
Fluggeschwindigkeit v_f	7.5m/s – 8.9m/s
Windgeschwindigkeit u_∞	0.5m/s – 0.9m/s

VI. Erlernen der Nicksteuerung – Freiflüge

Nach dem Training der Rollsteuerung in der Nähe von Moringen (Deutschland), Marina Beach (Kalifornien) und auf den Dünen bei Kitty Hawk (North Carolina) wurde der Nachbau des Große Doppeldeckers von drei Piloten geflogen: Markus Raffel (DLR), Andrew Beem (Windsports) und Billy Vaughn (Kitty Hawk Kits). Das Starten des Gleiters bei böigem Wind erfordert einige Übung. Es war letztlich jedoch mehreren Piloten möglich, den Gleiter sicher zu fliegen. Starke Windböen wurden allerdings konsequent vermieden, da man davon ausging, dass sie zu einem Strömungsabriss führen können, der die Fähigkeit des Piloten, seine für einen kontrollierten Flug erforderliche Körperhaltung zu bewahren, übersteigen kann.

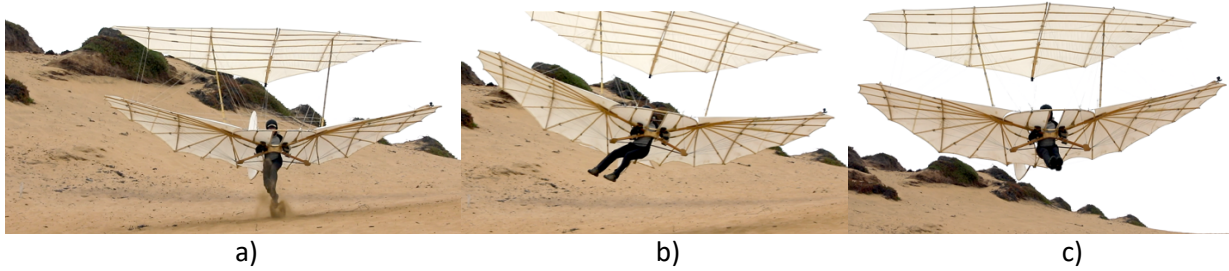
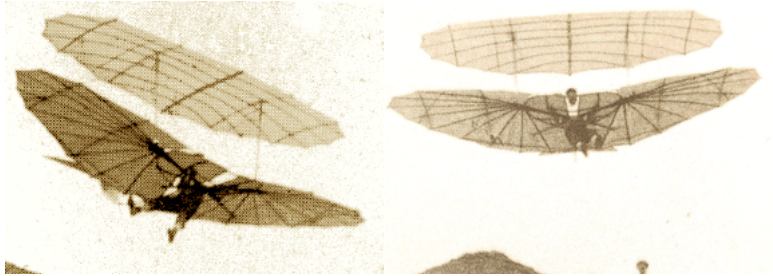


Fig. 8
Fußstart (a),
Abfangen eines absinkenden
rechten Flügels durch Verlagerung
der Beine nach rechts (b),
und
resultierender gerader Abflug (c).
(oben A. Beem, unten O. Lilienthal)



Die beste Trimmung des Apparates wurde bei einem geringen negativen Anstellwinkel des Höhenleitwerks erreicht. Der schwerste Pilot flog mit einem etwas höherem negativen Anstellwinkel des Höhenleitwerks (M. Raffel, 90 kg, $\eta_2 = -22,5^\circ$), während Andrew Beem mit einer Höhenleitwerkseinstellung von nur $\eta_3 = -16,6^\circ$ (68 kg) flog. Dadurch reagierte das Flugzeug in beiden Fällen angenehm und feinfühlig auf die Eingaben des Piloten und konnte leicht gegen den Wind ausgerichtet werden.

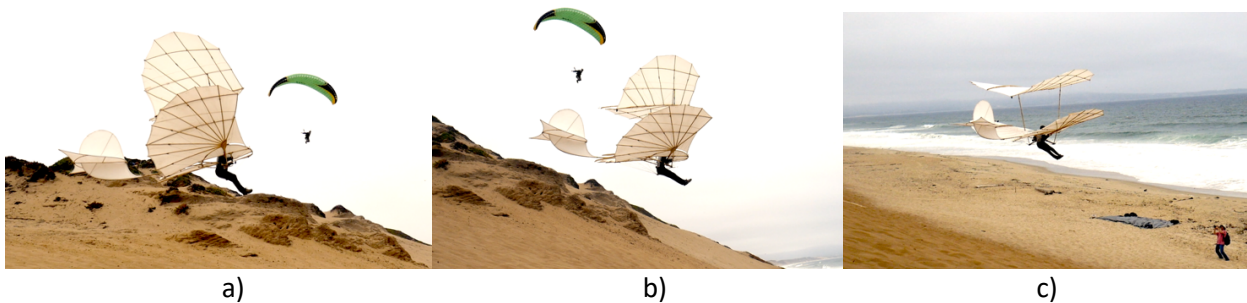
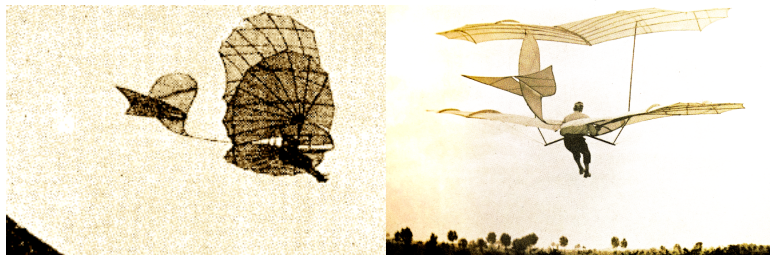


Fig. 9
Abheben (a),
Beschleunigen (b)
und
Abflug mit erfolgreicher Nick- und
Rollsteuerung (c).
(oben A. Beem, unten O. Lilienthal)



Bei mehreren Starts auf einer Sanddüne bewirkte der Scherwind ein anfängliches Absinken des linken Flügels, was eine kontraintuitive Gewichtsverlagerung des Piloten zum rechten Flügel hin erforderte. Hier zahlte sich die vorangegangenen Übungen in Deutschland und Kalifornien aus. Sobald der Wind einen der Flügel absenkte, verlagerte der Pilot instinktiv seine Beine auf die andere Seite (siehe Abb. 8a). Der Rollwinkel wird ähnlich wie bei einem modernen Hängegleiter gesteuert, allerdings müssen die Beine aufgrund des geringeren verlagerten Gewichts eine größere Strecke seitlich nach vorne zurücklegen, um eine ähnliche Reaktion des Gleiters zu erzeugen. Ein moderner Hängegleiter wird durch die Verlagerung des gesamten Pilotengewichts seitlich gesteuert, und außerdem

verstärkt eine Verschiebung des Kielrohres, an dem die Gurtaufhängung befestigt ist, auch das Rollmoment durch eine damit verbunden unterschiedliche Wölbung der beiden Flügel [10]. Das Fliegen in niedriger Höhe in der Nähe eines Hangs verhindert, dass man wenden kann. Im Wesentlichen muss der Flug daher immer Hangabwärts gerichtet bleiben. Daher bleibt die Frage, ob 360°-Kurven mit dieser frühen Flugzeugkonstruktion sicher ausgeführt werden können, durch unsere Tests unbeantwortet. Aus den Flugberichten Lilienthals ist allerdings bekannt, dass er - der viel höher flog - 180°-Kurven machte, diese aber dennoch lange zu vermeiden suchte, da sichere Landungen mit geringer Geschwindigkeit nur gegen den Wind durchgeführt werden können.

Bei der Landung muss der Pilot sein Gewicht nach hinten verlagern, um der Annäherung an den Boden bei höherer Geschwindigkeit abzubremsen und ggf. wieder etwas zu steigen. Ähnlich wie bei unseren Testflügen mit dem Eindecker genügte es, sich mit dem Oberkörper nach hinten zu lehnen und damit das Gewicht des ganzen Körpers nach hinten zu verlagern (siehe Abb.10 a). Wenn die Landung zu früh und zu langsam eingeleitet wurde, kam es zum langsamen aber massiven Strömungsabriss. Da eine massiv abgelöste Strömung nie stationär und nie zweidimensional ist, beginnt sich dabei einer der Flügel früher als der andere abzusenken und erzeugt so auch gleichzeitig mehr Widerstand. Dies führt zu einer unbeabsichtigten Drehung am Ende des Fluges, die sowohl bei Lilienthals Gleitern als auch bei modernen Hängegleitern auftritt. Der Trick, den Lilienthal Doppeldecker gut zu landen, besteht darin, dieses Manöver später und mit höheren Nickbewegungen Q durchzuführen, so dass der Strömungsabriss dynamisch erfolgt. Das dynamische Überziehen erzeugt an den Vorderkanten der Flügel Längswirbel, die die Strömung in einen zweidimensionalen Zustand zwingen [8], wobei ein kurzzeitig überhöhter Auftrieb und ein starkes Nickmoment erzeugt werden [9]. Nachdem diese Lektionen gelernt waren, konnte der Gleiter zuverlässig abgebremst (siehe Abb.10 b) und gelegentlich sogar auf einem Fuß gelandet werden, so wie es in jüngerer Zeit von Andrew Beem und von Otto Lilienthal vor 125 Jahren zuweilen demonstriert wurde. Letztendlich war es verschiedenen Piloten möglich, den Nachbau bis zu 15 Sekunden lang zuverlässig und gleichmäßig zu fliegen und routinemäßig sanfte gegen den Wind gerichtete Landungen durchzuführen.

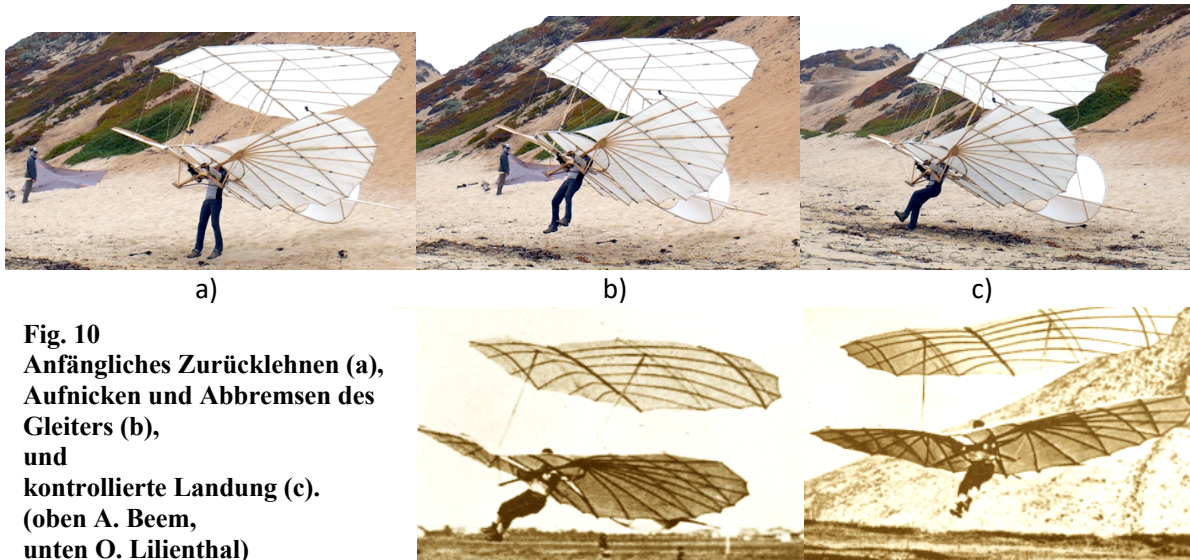


Fig. 10
Anfängliches Zurücklehnen (a),
Aufnicken und Abbremsen des
Gleiters (b),
und
kontrollierte Landung (c).
(oben A. Beem,
unten O. Lilienthal)

Table 3 Freiflüge – Juli 2019

Flugstrecke Δs	20m – 104m
Flughöhe A_f	0.1m – 5.5m
Fluggeschwindigkeit v_f	4.5m/s – 7.6m/s
Windgeschwindigkeit u_∞	1.8m/s – 6.9m/s

VII. Zusammenfassung und Ausblick

Ein authentischer Nachbau von Otto Lilienthals Großem Doppeldecker wurde zuverlässig und gleichmäßig über Entfernungen bis zu 104 Metern bergab geflogen. Kräfte- und Momentenmessungen bewiesen, dass die Konstruktion Belastungen von mehr als 240 kg aushält und von trainierten Piloten mit einem Gewicht zwischen 68 kg und 90 kg sicher geflogen werden kann, wenn diese in der Lage sind, ihre Beine auch unter dem Einfluss von Schwer- und Trägheitskräften bei Manövern sicher vorgestreckt zu halten. Starke Windböen müssen vermieden werden. Die V-Form der Flügel und die Trimmung des Flugzeugs, die durch die Lage des Hauptrahmens und die Neigung der Pfosten, die den oberen Flügel stützen, bestimmt wird, können genutzt werden, um unerfahrenen Piloten zu helfen, ungewollten Nick- und Rollbewegungen entgegenzuwirken. Eine Abdichtung der Flügel, z.B. mit einer Holzleim-Wasser-Lösung, wird empfohlen. Kiefernholz kann für einige Flügelrippen zusätzlich zu Weidenholz verwendet werden, um die Herstellung zu erleichtern, führt aber zu einem schwereren Flugzeug. Außerdem ist Kiefernholz weniger flexibel und erlaubt keine Optimierung der dreidimensionalen Form durch einfaches Verstellen der Drähte unter den Flügeln.

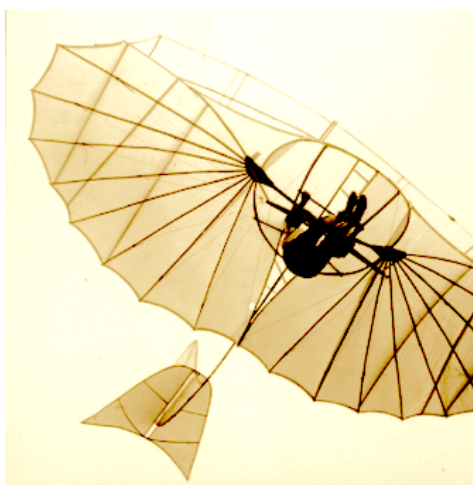


Fig. 11: 1896 Otto Lilienthal – Fliegeberg bei Berlin [7].

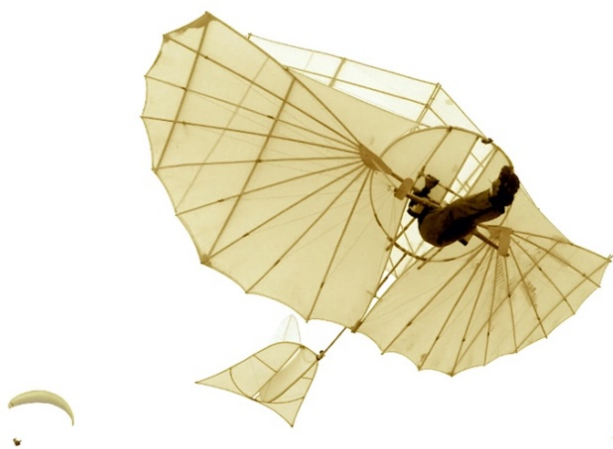


Fig. 12: 2019 Andrew Beem – Sand City bei Monterey.

Ein Vergleich von Fotografien von Lilienthals Großem Doppeldecker von 1895 und seinem Nachbau von 2018 lässt vermuten, dass Lilienthals ursprüngliches Segelflugzeug etwas weniger V-Form, eine stärkere Flügelkrümmung in der Mitte des unteren Flügels und weniger Schränkung am oberen Flügel hatte. Der Neutralpunkt von Lilienthals Großem Doppeldecker ist höher als das seines patentierten Eindeckers dem Normalsegelapparat, was die Flugstabilität erhöht und gleichzeitig die Seitensteuerung einschränkt. Die Flugstabilität des Doppeldeckers ist insgesamt höher, die Fluggeschwindigkeit und Wendigkeit aber sind im Eindecker größer.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Windexperimente durch Markus Krebs. Die Mitarbeiter des Otto-Lilienthal-Museums in Anklam (Deutschland) bauten den Doppeldecker mit großer Sorgfalt aus authentischen Materialien nach Otto Lilienthals Patentzeichnung und Fotos. Andrew Beem (Windsports, LA) flog den Doppeldecker in Kalifornien und gab äußerst wertvolle Anregungen und Unterstützung. Vielen Dank an Simine Short, Biographin von Octave Chanute, und Bernd Lukasch, Direktor des Otto-Lilienthal-Museums. Das Team des DHV hat in allen Phasen der Waagenmessungen leidenschaftlich und kompetent geholfen. Das Projekt wurde von vielen Flugbegeisterten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt unterstützt.

Literatur

- [1] Lilienthal, O., US Patent for a "Flying Machine" Nummer 544,816, patentiert 20th Aug. 1895, basierend auf dem deutschen Patent "Flugapparat" No. 77916, patentiert 3. Sept. 1893.
- [2] Lilienthal, O., „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“, Neuauflage 2003: ISBN 3-9809023-8-2.) Berlin 1889
- [3] Chanute, O. *Progress in Flying Machines*, (mit Anhang "The Carrying Capacity of Arched Surfaces in Sailing Flight", übersetzt aus der "Zeitschrift für Luftschiffahrt und Physik der Atmosphäre", 1893), American Engineer and Railroad Journal, Courier Corporation, 1894.
- [4] Dees, P., "The 100-year Chanute glider replica, an adventure in education World Aviation Congress (p. 5573), AIAA, 975573, Oct. 1997.
- [5] Wienke, F., Raffel, M., Dillmann, A., "Wind tunnel testing of Otto Lilienthal's production aircraft from 1893", AIAA Aviation Forum, Session: APA-26, June 17th, 2020.
- [6] Nitsch, S., *Die Flugzeuge von Otto Lilienthal*, Otto-Lilienthal-Museum, Anklam, Germany, 2016, ISBN 978-3-941681-88-0.
- [7] Schwipps, W., "Der Mensch fliegt", Verlag: Bernard & Graefe, 1988, ISBN 10: 3763758380
- [8] Savitzky, A. and Golay, M. J. E., "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures," Analytical Chemistry, vol. 36, no. 8, pp. 1627–1639, 1964. doi: 10.1021/ac60214a047.
- [9] Lilienthal, O., "Über meine Flugversuche 1889-1896", Ausgewählte Schriften, VDI-Verlag, 1996.
- [10] "Weight-shift Control Aircraft Flying Handbook" (FAA-H-8083-5) of the U.S. Departments of Transportation – Federal Aviation Administration, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013, ISBN 978-1490465319
- [11] McCroskey, W. J., Carr, L. W., McAlister, K. W., "Dynamic Stall Experiments on Oscillating Airfoils", *AIAA Journal*, Vol. 14 No. 1, 1976, pp. 57-63.
- [12] Kramer, M., "Increase in the maximum lift of an airplane wing due to a sudden increase in its effective angle of attack resulting from a gust", NACA-TM 678, übersetzt aus der "Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt," Vol. 23, Nr. 7, 1932.

Anhang:

Pilotenberichte über Flüge mit dem 1902 Wright Glider dem Großen Doppeldecker

"Ich habe den Wright-Segler von 1902 mehrmals geflogen, aber den Lilienthal Gleiter zu fliegen, war viel intuitiver. Ich bin ein Drachenflieger und fühlte mich auf Anhieb wie zu Hause. Es fühlte sich fantastisch und einfach an und der Gleiter landete genauso, wie ich es mir vorgestellt hatte. Es war großartig", sagte Billy Vaughn (Kitty Hawk Kites, NC).

Andy Beem (Windsports, CA) sagte nach den Flügen: "Er reagiert wunderbar in Bezug auf Nicken und Rollen. Ich hatte noch nie so viel Spaß wie bei dieser Gelegenheit, diesen Gleiter zu fliegen. Wenn ich einen Hängegleiter fliege, habe ich ein Befestigungsseil, das mich mit dem Flügel verbindet. Aber im Lilienthalapparat bin ich der Flügel. Es ist ein reines und vogelähnliches Gefühl. Ich bin sehr beeindruckt von Otto Lilienthals Konstruktion und Design seines Flugzeugs, bei dem die Gewichtsverlagerung für Start, Steuerung und Landung eingesetzt wird, und auch davon, wie die Wrights einige Nachteile im Design des Otto-Lilienthal-Flugzeugs gelöst und ihr Flugzeug kontrollierbarer gemacht und schließlich das erste Flugzeug der Welt entwickelt haben."