

Kleiner Windkanal für Schulversuche

Wolfgang Send¹

ANIPROP GbR, Sandersbeek 20, 37085 Göttingen

Kurzfassung

Für die Unterrichtung der Grundlagen der Physik des Fliegens an Schulen und Hochschulen und für Praktika wird ein neu entwickelter Windkanal vorgestellt und praktisch vorgeführt. Der Kanal hat einen Messquerschnitt von $0.18 \times 0.12 \text{ m}^2$ bei einer Strahlgeschwindigkeit von 12 m/s im Dauerbetrieb (Bereich 5-15 m/s) und einen Turbulenzgrad von unter 1 % (0.75 % bei 10 m/s). Messungen von Auftriebs- und Widerstandskraft auf eine Modelltragfläche werden angegeben. Der Impulsverlust im Nachlauf kann nachgewiesen werden. Die Randwirbel hinter den Seitenkanten der Tragfläche werden sichtbar gemacht. Der Wechsel des Anstellwinkels von positiven zu negativen Werten zeigt den Umschlag der Orientierung der Randwirbel, der für das Verständnis der Physik des Fliegens von fundamentaler Bedeutung ist. Die Teilung der Strömung in die beiden Anteile oberhalb und unterhalb der Tragfläche führt bei positivem Anstellwinkel zu erhöhtem Massenfluss auf der Oberseite und einer Abnahme auf der Unterseite, die nachgewiesen werden können und eine Auftriebskraft zur Folge haben.

1. Einleitung

Die Entwicklung eines kleinen Windkanals für die Demonstration der Grundlagen der *Physik des Fliegens* ist das Ergebnis aus zahlreichen Kursen und Vorträgen des Autors, in denen das Bedürfnis nach einer anschaulichen Vermittlung wichtiger Eigenschaften der Strömung um Tragflächen entstand. Das Thema Physik des Fliegens hat keinen besonderen Platz in den Stoffplänen der allgemeinbildenden Schulen und findet sich auch nicht in der physikalischen Grundausbildung an deutschen Hochschulen und Universitäten. Einschlägige Lehrbücher - wie etwa das bekannte Werk *Gerthsen Physik* - gehen über einige elementare Anmerkungen zu Strömungen nicht hinaus. Im Gegensatz dazu gibt es ein deutliches Interesse bei vielen jungen Leuten, mehr über das Fliegen in der Natur wie in der Technik erfahren zu wollen. Es werden oft Arbeitsgemeinschaften an Schulen gebildet und Neigungskurse angeboten, wie der Autor aus langjähriger Beratungstätigkeit mit fachlicher Aufklärung und praktischer Hilfestellung weiß.

In diesem Umfeld ist eine erprobte und im Anspruch angemessene Versuchseinrichtung von großem Nutzen. Wegen der vergleichsweise geringen Nachfrage bieten die Lehrmittelfirmen entweder keine Windkanäle an oder nur solche von einfacher und unzureichender Ausführung. Die vorgestellte Versuchseinrichtung ist der Prototyp eines für den Markt vorgesehenen Produktes, das in kleiner Serie produziert und angeboten werden soll.

Weiterhin gibt es einen methodischen Gesichtspunkt: Das Internet verschafft auch Erklärungen

zum Fliegen weite Verbreitung, die weder qualitativ und noch weniger quantitativ einer Nachprüfung standhalten. In der Physik ist und bleibt aber das Experiment Prüfstein der Theorie und Hilfsmittel bei der Vermittlung des Wissens. Beiden Aspekten sollen Versuchsergebnisse dienen, die auch ohne große Versuchsanlagen beschafft werden können.

Der Autor hat in einem früheren Artikel [1] den experimentellen und theoretischen Hintergrund beleuchtet, vor dem die Grundlagen der Physik des Fliegens vermittelt werden sollten, und ein Problem benannt, mit dem leider viele Darstellungen von so genannten einfachen Experimenten in Konflikt geraten:

- Die Bedingungen, unter denen zentrale Aussagen der Aerodynamik in der Theorie gewonnen werden, lassen sich im Experiment nur bei großer Sorgfalt hinsichtlich der Strömungsqualität und der Vorgabe bestimmender Kenngrößen näherungsweise herstellen.
- Im Spannungsfeld zwischen theoretischen Aussagen und ihrer praktischen Überprüfung entstehen Missdeutungen der Phänomene, mit denen bis heute Lehrende konfrontiert werden, die Spaß am Thema Aerodynamik und an der Unterrichtung der Physik des Fliegens haben.

Diesen Konflikt kann auch der vorgestellte Kanal nicht ganz lösen, wie noch erläutert wird. Aber die Reaktionskraft der Luft, die aus Auftrieb *und* Widerstand besteht, wird mit der Darstellung des Impulsverlustes und der Entstehung der Randwirbel in wesentlichen Punkten anschaulicher vermittelt.

¹ Der Autor ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Aeroelastik, Bunsenstr. 10, 37073 Göttingen. Die Arbeit ist hervorgegangen aus einer genehmigten Nebentätigkeit.

2. Überlegungen zur Auslegung des Kanals

Die folgenden praktischen Überlegungen haben die Entwicklung und Auslegung des kleinen Windkanals mit der Bezeichnung ANIPROP KWK2 nachhaltig beeinflusst:

- Der Kanal soll in einem normalen Laborschrank untergebracht werden können.
- Der Aufbau soll die Länge eines üblichen Labortisches nicht überschreiten.
- Handelsübliche Messgeräte und das Stativmaterial an Schulen sollen Verwendung finden können.
- Der Kanal soll gleichwohl den quantitativen Nachweis von Auftrieb und Widerstand ermöglichen.
- Der Nachbau soll mit handelsüblichen Bauteilen und Materialien prinzipiell möglich sein.
- Im Unterricht entwickelte Modelle sollen eingebaut und ausgetauscht werden können.

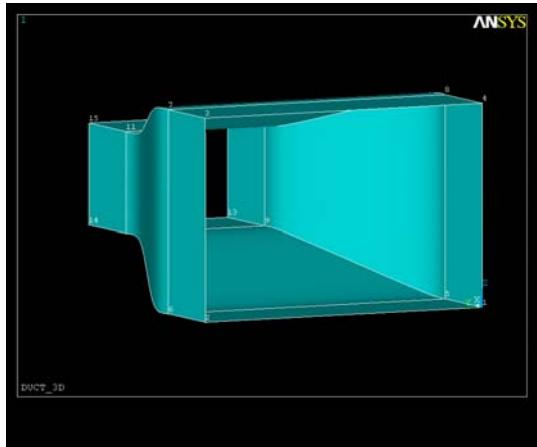


Abb 1: Gestaltung der Kontraktionsstrecke 4:1.

Der Kanal ist einer offener Kanal, bei dem die Luft von sechs Lüftern angesaugt und von einem Wabengleichrichter beruhigt wird. Die professionelle Lösung bei Windkanälen zur Verringerung der Turbulenz in der durch den Antrieb beschleunigten Strömung ist die Aufweitung des Kanalquerschnitts in einer Beruhigungskammer mit anschließender Einschnürung des Luftstrahls. Aus Platzgründen und im Hinblick auf den Verwendungszweck ist dieses Bausegment ausgelassen, könnte aber prinzipiell zwischen Antriebseinheit und Kontraktionsstrecke eingefügt werden (Abb. 1). Beide Baugruppen sind durch einen Verschluss miteinander verbunden, der gelöst werden kann.

Den Daten in Tab. 1 ist der Bereich der dimensionslosen **Reynoldszahl** Re zu entnehmen, die eine wichtige Kenngröße für die Beschreibung der Physik der Strömung darstellt. Definiert ist diese Zahl als

$$Re = \frac{U \cdot \rho \cdot \ell}{\eta}. \quad (1)$$

Darin ist U die Geschwindigkeit der Anströmung, ρ die Dichte der Luft, η die Zähigkeit der Luft und ℓ

eine charakteristische Länge, die bei Tragflächen durch ihre mittlere Länge in Stromrichtung gegeben ist. Eine grobe Einteilung der Strömung um Tragflächen charakterisiert drei Bereiche:

- Unterhalb von $Re = 50\,000$ ist die Strömung in dem so genannten *unterkritischen* Bereich, in dem die Strömung um eine Tragfläche gewöhnlich wohlgeschichtet (laminar) bleibt.
- Zwischen $50\,000$ und $100\,000$ findet ein Umschlag (Transition) von laminarer Strömung in eine örtlich ungeordnete (turbulente) Strömung statt.
- Erst für den so genannten *überkritischen* Bereich oberhalb von $Re = 100\,000$ gelten die zentralen Aussagen zu Auftrieb und Widerstand von Tragflächen, wie sie sich in aerodynamischen Lehrbüchern finden,

In diesem Bereich haben Tragflächen den bekannten hohen Auftrieb bei kleinem Widerstand. Die theoretischen Erklärungen für die Entstehung des Auftriebs mit einfachen Wirbelmodellen können erst für diesen Bereich schlüssig im Experiment nachgewiesen werden. Der Grund dafür liegt in den Vereinfachungen der Erhaltungssätze für Impuls und Energie, die auf der Annahme einer sehr hohen Reynoldszahl beruhen.

Strömungen um Tragflächen im unterkritischen Bereich sind bis heute vergleichsweise wenig erforscht und zeigen ein komplexes Verhalten. Geringfügige Änderungen der Form der Tragflächen bringen manchmal große Änderungen für das Strömungsbild mit sich. Untersucht wurden diese Phänomene erstmals von F.W. Schmitz [2] um 1940. Gleichwohl lassen sich mit dem Kanal die Grundlagen nachvollziehen, die für die Physik des Fliegens von wesentlicher Bedeutung sind. Einfache Erklärungsmodelle lassen sich aus den Beobachtungen bei diesen niedrigen Reynoldszahlen jedoch nicht entwickeln, da die Physik des Impulstransports immer komplexer wird, je kleiner die Reynoldszahlen werden.

Geschwindigkeitsbereich U	5-15	m/s
Kontraktionsverhältnis	4:1	-
Nenngeschwindigkeit	12	m/s
Messquerschnitt B x H	0.18 x 0.12	m ²
Turbulenzgrad bei 10 m/s	0.75	%
Bezugslänge ℓ	0.06	m
Reynoldszahlbereich für ℓ	20 - 60 000	-
Maximale Antriebsleistung	180	W
Spannungsversorgung	bis 30	V

Tab. 1: Technische Daten des Windkanals.

3. Versuchsaufbau

In Abb. 2 ist ein typischer Versuchsaufbau zu sehen. Links steht die Antriebseinheit, die in die Kontraktionsstrecke übergeht. Am rechten Bildrand ist der Messtisch zu erkennen, der mit Muffen an der rechten Abstützung der Kontraktionsstrecke verbunden ist. In der Mitte steht das Netzteil für den Antrieb. Daneben liegt ein Messgerät zur Messung

von Differenzdrücken, die von einem Prandtlschen Staurohr geliefert werden. Damit lässt sich die Geschwindigkeit der Strömung ermitteln.

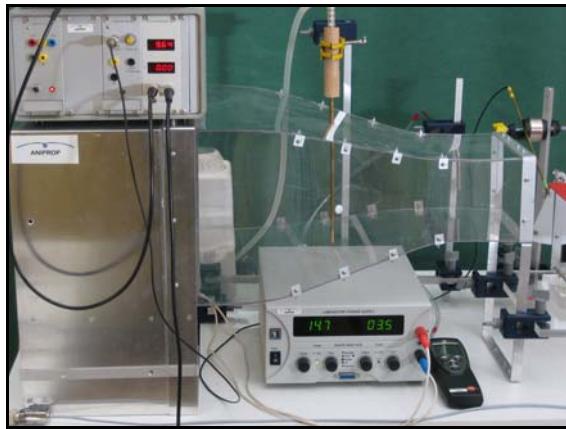


Abb. 2: Typischer Versuchsaufbau mit dem Prototypen des Windkanals.

Durch die vertikale Sonde wird Dampf in den Luftstrahl geleitet, um die Randwirbel sichtbar zu machen. Horizontale wie vertikale Anordnung des Dampfrohres sind möglich. Das Messingrohr hat vier Austrittsbohrungen von je 1 mm Durchmesser, die über seine Länge verteilt sind. Für die Dampferzeugung zur Sichtbarmachung der Randwirbel verwendet der Autor bislang den Wasserdampf aus einer einfachen Espressomaschine (alle anderen Medien haben schwer abschätzbare gesundheitliche Belastungen für die zumeist jugendlichen Zuschauer). Ein seitlich angebrachter Diaprojektor mit einem vertikalen Spalt als Diapositiv erleuchtet eine Ebene hinter der Tragfläche. In einem abgedunkelten Raum



Abb. 3: Messtisch für eine Tragfläche (rot).

sind die Randwirbel ohne besondere Hilfsmittel gut zu erkennen.

Abb. 3 zeigt in vergrößerter Darstellung den Mess- tisch, mit dem die Tragfläche im Luftstrom gehalten wird. Hinter der Tragfläche ist eine Geschwindigkeitssonde zu erkennen. Die Messung beruht auf der Abkühlung eines wärmeabhängigen Halbleiters oder es wird ein so genannter Hitzedraht verwendet. Das Messgerät oberhalb der Antriebseinheit in Abb. 2 wandelt das Signal der Sonde in eine Geschwindigkeitsangabe um. Es muss aber nicht notwendig eine geeichte Sonde sein. Für eine qualitative

Darstellung der Strömungsvorgänge reicht schon ein kleines Glühbirnchen, wie es in Spielzeugeisenbahnen verwendet wird. Mit etwas Geschick wird der Glaskolben entfernt und der Glühfaden mit einem Vorwiderstand und bei geringem Strom als Sensor betrieben².

4. Messung von Auftrieb und Widerstand

In Abb. 4 ist das Prinzip dargestellt, nach dem die Messung von Auftrieb und Widerstand einer Tragfläche vorgenommen wird. Die Tragfläche ist in einen Rahmen aus zwei dreiecksförmigen Haltern eingespannt, der seinerseits auf einer Bodenplatte steht. Diese seitlichen Halterungen sind an den unteren beiden Eckpunkten durch zwei Rundstäbe verbunden, die ihrerseits in zwei Lagerschalen liegen. Die rechtwinkligen Dreiecke haben zwei gleiche Schenkel der Länge L . Zwischen den oberen Eckpunkten ist um die Achse durch den Punkt P_D drehbar die Tragfläche eingespannt. Diese Konstruktion wird nachfolgend Support genannt. Zweck dieser Konstruktion ist die einfache Verwendbarkeit elektronischer Waagen, die unter den beiden Lagerschalen angebracht werden können. Messtisch und Support sind fester Bestandteil des Windkanals.

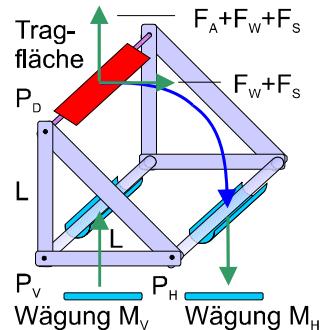


Abb. 4: Messprinzip des Windkanals

Dargestellt sind die Kräfte, die durch die Strömung auf die zwei Achsen ausgeübt werden, die von den Lagerschalen gehalten werden. Diese sind die Auftriebskraft F_A und die Widerstandskraft F_W , die die Tragfläche erfährt, und die Widerstandskraft F_s des Supports.

- Die Anordnung der beiden Messachsen bedingt, dass die vertikale Auftriebskraft nicht unabhängig von der horizontalen Widerstandskraft gemessen werden kann.

Während die Auftriebskraft direkt auf die Achse durch den Punkt P_v wirkt, übt die Widerstandskraft um die vordere Messachse ein Drehmoment aus. Da die beiden Schenkel $P_v - P_D$ und $P_h - P_D$ gleich lang sind, wirkt die Widerstandskraft folglich in gleicher Größe auf die hintere Messachse durch den Punkt P_h . Auf die hintere Messachse wirkt nur die Widerstandskraft.

² Dabei sollte der Warmwiderstand des Glühfadens maximal das Doppelte des Kaltwiderstands betragen. Je wärmer der Faden wird, desto besser ist natürlich die Auflösung schneller Vorgänge.

Die Widerstandskraft übt gleichzeitig um die hintere Achse durch den Punkt P_H ein Drehmoment aus und erleichtert dadurch in gleicher Größe die Kraft auf die vordere Messachse durch den Punkt P_V . Neben der Auftriebskraft wird an der vorderen Messachse folglich stets auch die Widerstandskraft gemessen. Gemessen werden die Kräfte nacheinander über eine oder aber gleichzeitig über zwei Waagen. Abb. 3 zeigt eine Ausführung, bei der die Kraft der hinteren Lagerschale (Index H) durch die Bodenplatte des Messtisches hindurch auf eine Waage mit Wägeplatte geleitet wird. Die vordere Lagerschale (Index V) ruht auf einem Acrylblock, den der Autor für eine simultane Messung durch eine weitere kleine Taschenwaage ersetzt.

5. Messung an einer Tragfläche

Wir nehmen zur Vereinfachung der Erklärungen an, dass die Messung der Kräfte simultan erfolgt. Mit Modell sei nachfolgend die Tragfläche oder ein anderes Messobjekt bezeichnet. Das vermessene Modell ist eine 3 mm dicke Kunststoffplatte mit den Abmessungen $0.06 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ (Flügeltiefe \times Spannweite). An der Vorderkante ist die Platte abgerundet, an der Hinterkante spitz zulaufend.

Wenn der Support mit dem Modell ohne Wind (Index 0) auf die beiden Waagen gesetzt wird, dann seien die beiden angezeigten Massen als

$$\begin{aligned} M_{V0} &\text{ für die vordere Waage und als} \\ M_{H0} &\text{ für die hintere Waage} \end{aligned}$$

bezeichnet. Die Summe beider Anzeigen entspricht der Gesamtmasse von Support und Modell, die Aufteilung auf die beiden Waagen hängt vom Modell und der konstruktiven Ausführung des Supports ab. Wird nun die Strömung angestellt, so ergeben sich zwei Anzeigen M_V und M_H . Für die vordere Waage ergibt sich die Gleichung

$$g M_V = g M_{V0} - F_A - F_W - F_S \quad (2)$$

und für die hintere Waage

$$g M_H = g M_{H0} + F_W + F_S \quad (3)$$

g ist die Schwerkraft. Werden die Massen auf den Waagen in Gramm angezeigt, dann haben die Kräfte die Einheit mN. Die Widerstandskraft des Supports wird bestimmt nach Ent-

fernen des Modells bei gleicher Anströmgeschwindigkeit.

Die Messung von Massen im Bereich $1/10 \text{ g}$ oder gar $1/100 \text{ g}$ ist mit Schwankungen behaftet, die teils durch die Turbulenz in der Strömung, teils durch Drifteffekte der Waagen entstehen. Auch die Handhabung verursacht zusätzliche Abweichungen. Tab. 2 zeigt als Beispiel die Messung der Widerstandskraft des Supports, der in Abb. 3 gezeigt ist. M_S ist die ermittelte Masse zur Widerstandskraft F_S des Supports. Die wechselseitige Prüfung der Daten führt zu dem Ergebnis, dass die absolute Genauigkeit nicht wesentlich unter einige Zehntel Gramm zu bringen ist. Diese Schwankungen zeigen sich in den dargestellten Ergebnissen. Tab. 3 zeigt einen Auszug aus dem Messprotokoll. Die Ermittlung von F_A und F_W erfolgt nach Gl. (2) und (3).

Winkel	MV [g]	MH [g]	Fa [mN]	Fw [mN]
-20	121.20	76.50	-373.22	197.13
-18	121.50	73.66	-348.31	169.28
-18	120.30	74.93	-349.00	181.73
-16	121.20	71.04	-319.68	143.58
-16	121.40	70.18	-313.20	135.15
-14	122.10	66.01	-279.18	94.26
-14	120.90	67.36	-280.65	107.50
-12	119.40	64.44	-237.31	78.86
-12	119.50	65.07	-244.46	85.04
-10	118.60	61.26	-198.28	47.68
-10	117.80	62.18	-199.45	56.70
-8	115.50	59.70	-152.58	32.38
-8	115.90	59.30	-152.58	28.46
-6	111.30	59.53	-109.73	30.72
-6	111.10	58.71	-99.73	22.68
-4	109.90	58.19	-82.86	17.58
-4	109.70	57.48	-73.94	10.61
-2	103.40	58.44	-21.57	20.03
-2	104.80	57.11	-22.26	6.99
0	99.30	58.02	22.75	15.91
0	100.90	57.59	11.28	11.69
0	101.40	56.98	12.36	5.71

Tab. 3: Auszug aus dem Messprotokoll

Ohne Support: $u_0 = 0 \text{ m/s}$, mit Support $u_0 = 12 \text{ m/s}$								
$u_0 =$	12.000	m/s	0/Support	M 1	M 2	M 3	M 4	Mittelwert
$g =$	9.806	m^2/s	0/Support	97.30	97.00	98.60	99.2	98.03
$\rho =$	1.205	kg/m^3	MV0 =	50.54	50.95	49.13	48.9	49.88
$q_0 =$	86.724	N/m^2	MHO =	92.20	91.60	93.30	92.6	92.43
$\rho_0 =$	87.200	N/m^2	MVS =	55.28	55.86	53.76	55.08	55.00
$\Delta \rho_0 =$	+/- 0.4	N/m^2	MHS =	5.60	g		MVO+MHO =	147.91
$A =$	0.006	m^2	MVO-MVS =	5.12	g		MVS+MHS =	147.42
$F_0 =$	0.520	N	MHS-MVO =	5.36	g		Mittel =	147.66
$I =$	0.06	m	MS =	g				g
$Re =$	47664							

Tab. 2: Daten der Messung für die Widerstandskraft des Supports.

Die Messung ist durchgeführt worden für verschiedene Anstellwinkel in Schritten von 2 Grad in der Reihenfolge von 0 bis 20 Grad, zurück bis -20 Grad und vorwärts bis 0 Grad. Anschließend wurden die Ergebnisse sortiert, so dass sich zu einem Anstellwinkel in der Regel zwei Werte ergaben. Die Einstellung des Winkels ist mit einer Genauigkeit von weniger als 0.5 Grad möglich (siehe Abb. 5).

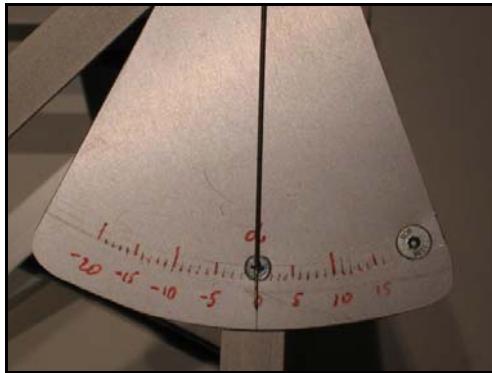


Abb. 5: Skala für Anstellwinkel.

6. Nachweis von Auftrieb und Widerstand.

Dargestellt sind in Abb. 6 zunächst die Komponenten der Reaktionskraft des Fluids, Widerstand und Auftrieb, über dem Anstellwinkel. Die Daten sind jeweils interpoliert worden durch ein kubisches Polynom. Dadurch wird sichtbar, dass der Widerstand eine quadratische Funktion, der Auftrieb eine lineare Funktion des Anstellwinkels ist. Theoretisch erwartet man auch ein solches Verhalten als Ergebnis der Vereinfachungen, die bei hohen

Reynoldszahlen gemacht werden. Experimentell stellt sich bei höheren Reynoldszahlen jedoch selbst für dicke Tragflächen ein Ergebnis ein, bei dem der Auftrieb oberhalb von etwa 12-15 Grad einen deutlichen Einbruch zeigt, weil die Strömung bei diesem Anstellwinkel auf der Oberseite „abreißt“.

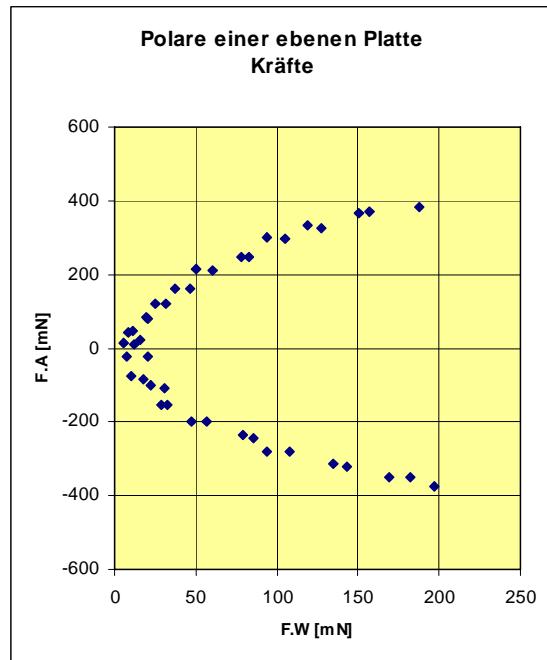


Abb. 7: Polarendiagramm nach Lilienthal.

Dass die Linearität bei der ebenen Platte im durchgeführten Experiment noch für Anstellwinkel bis 20 Grad erhalten bleibt, ist auch für einen Aerodynamiker überraschend und vom Autor deshalb

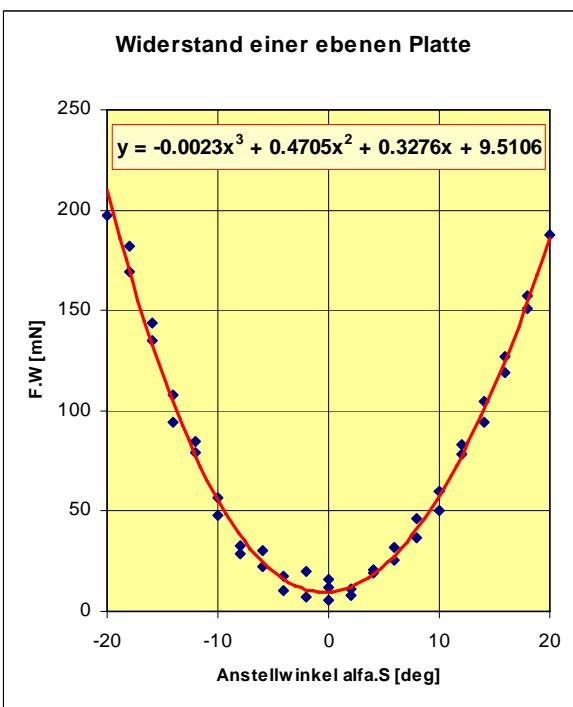
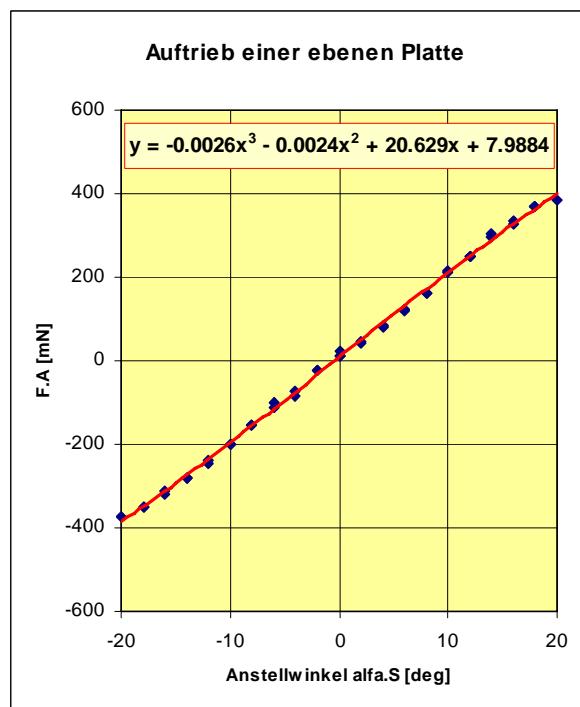


Abb. 6: Komponenten der Reaktionskraft des Fluids, Widerstand und Auftrieb.



mehrfach überprüft worden. Das Ergebnis ist vermutlich Folge der niedrigen Reynoldszahl von $Re = 48\,000$ im Zusammenwirken mit dem Turbulenzgrad der Strömung. Es wurde bereits erwähnt, dass die Umströmung von Tragflächen bei diesen niedrigen Reynoldszahlen ein komplexes Verhalten zeigt, das noch recht wenig erforscht ist.

Abb. 7 zeigt beide Komponenten in einem so genannten Polarendiagramm, das auf O. Lilienthal zurückgeht [3]. Der Anstieg des Widerstands mit dem Anstellwinkel ergibt sich aus dem Auftrieb, den die angestellte Platte erfährt. An den Rändern der Tragfläche führt der Unterdruck auf der Oberseite der Tragfläche zu einem Druckausgleich. Die Partikel drängen von der Unterseite auf die Oberseite und bleiben zugleich hinter der Tragfläche zurück. Bei negativem Anstellwinkel verläuft dieser Prozess spiegelbildlich. Dieses Aufrufen der Strömung bedeutet Aufnahme von kinetischer Energie, die in den Randwirbeln hinter der Tragfläche zurückbleibt. Die Abgabe von kinetischer Energie an die Strömung äußerst sich als Widerstand, den die Tragfläche erfährt.

Da dieser Widerstand durch die Druckverhältnisse an der Tragfläche zustande kommt, wird er auch als *Druckwiderstand* bezeichnet. Der zweite Anteil des Widerstands entsteht direkt durch Reibung der Strömung an der Oberfläche infolge der Zähigkeit der Luft.

7. Nachweis des Reibungswiderstands

Bezieht man Widerstand und Auftrieb auf den so genannten Staudruck und den Grundriss A der Tragfläche, so erhält man den *Beiwert* des Widerstands und des Auftriebs:

$$c_w = \frac{F_w}{\frac{1}{2} \rho u_0^2 A}, \quad c_a = \frac{F_a}{\frac{1}{2} \rho u_0^2 A} \quad (4)$$

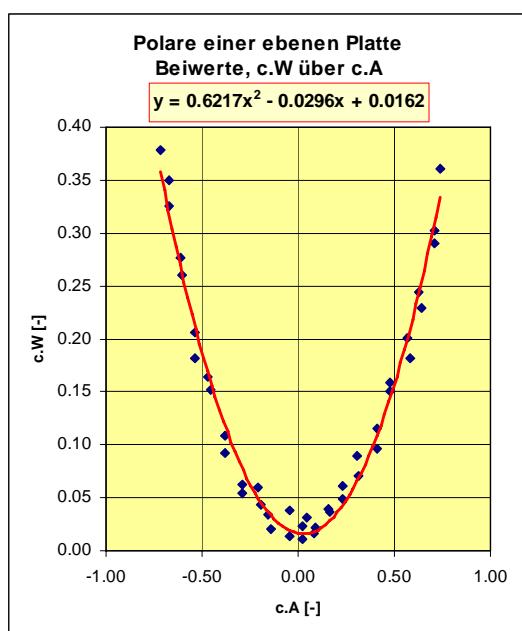


Abb. 8: Polarendiagramm der Beiwerthe.

Die Polare der Beiwerthe in Abb. 8 zeigt einen minimalen Beiwert, der Folge des Reibungswiderstands ist. Der zahlenmäßige Wert dieses Minimums von 0.016 steht in engem Zusammenhang mit der so genannten Grenzschicht, in der sich - direkt an der Oberfläche, die Zähigkeit als Impulsverlust bemerkbar macht. Diese Nachrechnung verlangt allerdings vertiefte strömungsmechanische Kenntnisse und soll deshalb an dieser Stelle unterbleiben.



Abb. 9: Nachweis des Geschwindigkeitsverlustes

Theoretisch haftet die Strömung direkt auf der Oberfläche, experimentell geht die Geschwindigkeit auf einen typisch niedrigen Wert zurück, der als „Delle“ mit einem Geschwindigkeitssensor nachgewiesen werden kann. Der Sensor wird direkt hinter der Hinterkante der Tragfläche quer zur Anströmung bewegt (Abb. 9). Abb. 10 zeigt den theoretischen Verlauf, Abb. 11 das Ergebnis des Experiments.

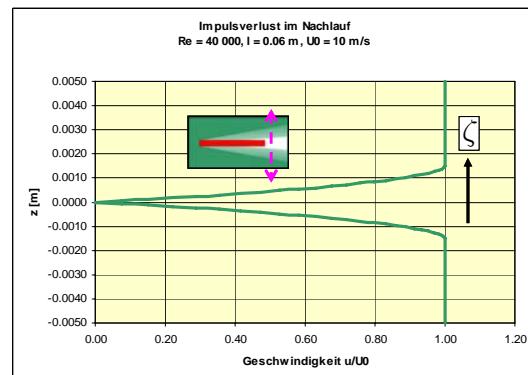


Abb. 10: Theoretischer Verlauf

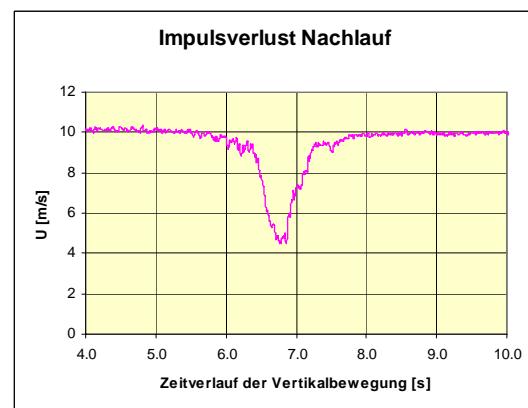


Abb. 11: Messung mit Sensor

8. Entstehung des Auftriebs

Auftrieb entsteht bei einer angestellten Tragfläche durch eine Veränderung des Massenstroms.

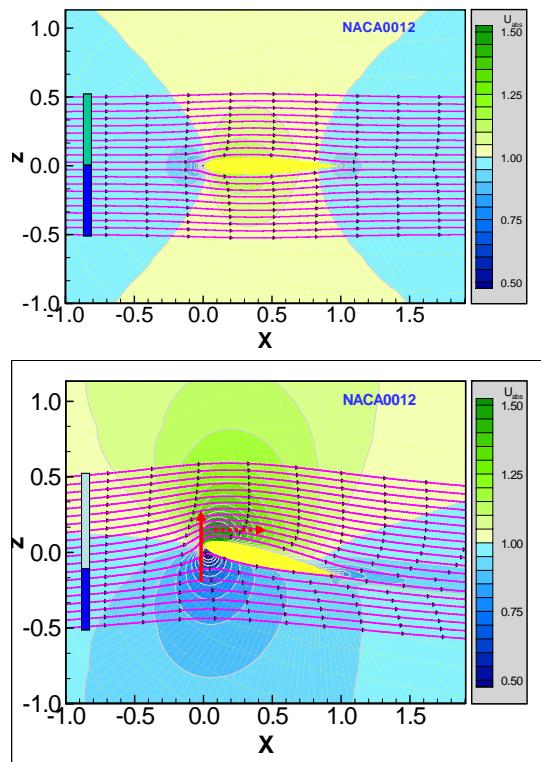


Abb. 12: Änderung des Massenstroms;
Schichtlinien des Geschwindigkeitsbetrags.

Bei einer symmetrischen Tragfläche ohne Anstellwinkel verteilt sich das Fluid aus einem gegebenen Querschnitt, der symmetrisch zur Tragfläche gewählt ist, auf Ober- und Unterseite zu gleichen Teilen. Wird nun ein positiver Anstellwinkel eingestellt, so stößt die teilende Stromlinie auf der Unterseite gegen das Profil. Der Massenstrom aus dem gleichen Querschnitt fließt nun unsymmetrisch um das Profil. Um die Oberseite wird mehr Masse umgelenkt als um die Unterseite. Da das Fluid inkompressibel ist, bedeutet der erhöhte Massenstrom auf der Oberseite auch eine höhere Fließgeschwindigkeit. Auf der Unterseite stellt sich eine geringere Fließgeschwindigkeit ein. Abb. 12 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung für beide Fälle.

Da die Summe von statischer Energie und kinetischer Energie (pro Volumenelement) nach der Gleichung von Bernoulli konstant bleibt, bedeutet eine höhere Fließgeschwindigkeit auch eine höhere kinetische Energie an diesen Stellen. Deshalb nimmt die statische Energie pro Volumeneinheit, der Druck, an diesen Stellen ab. Auf der Unterseite der Tragfläche nimmt der Druck entsprechend zu. In der Summe führt diese Druckdifferenz zu einer Querkraft, die *dynamischer Auftrieb* genannt wird. Abb. 13 zeigt dieses Verhalten der Geschwindigkeit im Experiment. Dargestellt ist der Weg des Sensors in der zweiten Bildhälfte von Abb. 12. Man erkennt die Abnahme der Geschwindigkeit im Bereich des Staupunktes und die Zunahme der Geschwindigkeit

im Bereich der Oberseite. Bewegt sich der Sensor auf der Oberseite von der Vorderkante über die Tragfläche, so nimmt die Geschwindigkeit kurz nach der Vorderkante noch einmal deutlich zu.

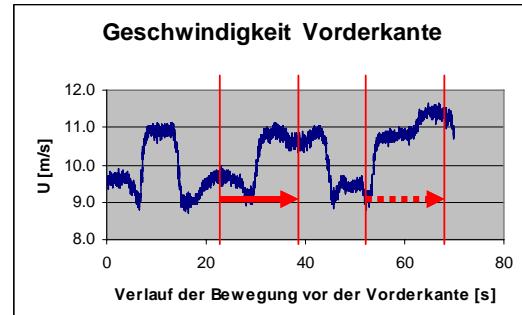


Abb. 13: Messung der Geschwindigkeit.

Schließlich seien noch zwei Bilder angefügt, die die Umkehrung der Orientierung der Randwirbel bei positivem und negativem Anstellwinkel zeigen.



Abb. 14: Randwirbel bei Auftrieb und Abtrieb.

Das obere Bild in Abb. 14 zeigt das Einrollen der Wirbel zur Oberseite hin, also bei Auftrieb. Im unteren Bild drängen die Partikel zur Unterseite, da ein negativer Anstellwinkel vorhanden ist.

Literatur

- [1] SEND, Wolfgang (2002): Auftrieb und Wirbeldichte beim Fliegen. In: Nordmeier, V. (Hrsg.): Didaktik der Physik – Leipzig 2002. Berlin: Lehmanns Media.
- [2] SCHMITZ, F.W.: Aerodynamik des Flugmodells. Nachdruck 7. Auflage 1983 Luftfahrt-Verlag Axel Zuerl.
- [3] LILIENTHAL, Otto: Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, Gaertners Verlagsbuchhandlung, Berlin 1889.
(Nachdrucke: Siehe <http://www.aniprop.de>)