



Seminararbeit

Thema: Untersuchung von Flügelprofilen im selbstgebauten Windkanal

Zusätzlich Kurztitel (Nur falls das Thema mehr als 3 Zeilen zu je 44 Zeichen lang ist):

Verfasser/in: Simon Wagner
Leitfach: Physik
Seminarkürzel: 2W_ph
Lehrkraft: Dr. Thomas Grillenbeck

Abgabe der schriftlichen Arbeit am:

[Datumsstempel Sekretariat]

Präsentation mit Prüfungsgespräch am:

____.____. 20 ____

Bewertung	Note	in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x 3	
Abschlusspräsentation				x 1	
Summe					
Gesamtleistung nach § 29 (7) GSO = Summe: 2 (gerundet)					

Unterschrift der Lehrkraft

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik

1.2 Zielsetzung

2. Theoretische Grundlagen und physikalische Prinzipien des Fliegens

2.1 Die Bernoulli-Gleichung

2.2 Der Magnus Effekt

2.3 Die Entstehung einer Querkraft

2.4 Zusammenhang zwischen Anstellwinkel und Auftrieb

3. Experimenteller Aufbau

3.1 Bearbeitung und Aufbau der beiden Windkanäle

3.2 Auswahl und Herstellung der prototypischen Tragflächen

4. Durchführung des Experiments

4.1 Beschreibung des Experimentablaufs

4.2 Erwartungen an die Ergebnisse und Hypothesen

4.3 Beobachtung der Auftriebskraft und Umströmung

4.4 Datenerfassung und Diagramme

5. Diskussion der Ergebnisse

5.1 Vergleich der Umströmungsbeobachtung mit der Theorie

5.2 Allgemeiner Vergleich der Daten unter den Flügelprofilen

5.3 Vergleich und Interpretation der Datenerfassung zum Zusammenhang F_A zum Winkel

5.4 Vergleich und Interpretation der Datenerfassung zum Zusammenhang F_A -Geschwindigkeit

6. Fazit

6.1 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und Ausblick

7. Zeichenverzeichnis

8. Quellenverzeichnis

8.1 Literaturverzeichnis

8.2 Internetquellen

9. Danksagung

10. Erklärung der eigenständigen Erstellung

1. Einleitung

1.1 Thematik:

„Ich ermahne dich, Ikarus, dich auf mittlerer Bahn zu halten, damit nicht, wenn du zu tief gehst, die Wellen die Federn beschweren, und wenn du zu hoch fliegst, das Feuer sie versengt. Zwischen beiden fliege.“¹. Dies ist ein Zitat des berühmten römischen Schriftstellers Ovid aus dem Mythos Dädalus und Ikarus. Der Traum vom Fliegen beschäftigt die Menschheit schon seit Jahrtausenden.

Trotz der modernen, menschlichen Errungenschaft des Fliegens, ist die Thematik bis heute im wissenschaftlichen Fokus. Insbesondere in Anbetracht der zunehmenden Besorgnis über den Klimawandel, der unter anderem durch den CO₂-Ausstoß aus der Luftfahrtindustrie beeinflusst wird, suchen Wissenschaftler und Ingenieure nach Möglichkeiten, die Aerodynamik von Flugzeugen zu optimieren, um die Umweltauswirkungen der Luftfahrtindustrie zu minimieren und die Effizienz des Fliegens zu steigern.

Hierzu werden Windkanaltests durchgeführt, die die aerodynamischen Eigenschaften von Flugzeugträgerprofilen analysieren und des Weiteren auftriebsbegünstigende Situationen erforschen, um sicherzustellen, dass diese Flugzeugträgerprofile in der Praxis sowohl sicher als auch effizient fliegen.²

1.2 Zielsetzung:

Das Ziel der vorliegenden Seminararbeit ist es folgende Problemstellung anhand der Theorie und einem vergleichenden Experiment zu beantworten:

1. Wie hoch ist der Auftrieb bei unterschiedlichen Flügelprofilen, wenn sie unter verschiedenen Anstellwinkeln von 0°; 10°; 20°; 30°; 40° angeströmt werden?
2. Welche Rolle spielt die Geschwindigkeit?
3. Welche Rolle spielen die Strömungsfelder?
4. Welcher Flügel hat die besten Eigenschaften und begünstigt den Auftrieb?

Hierzu ist es nötig, sich allgemein mit den physikalischen Hintergründen des Fliegens zu befassen, woraus sich Hypothesen verfassen lassen, die mithilfe von Beobachtungen verglichen werden.

¹ <https://www.aphorismen.de/zitat/111415>

² (Müller-Dum, 2023)

2. Theoretische Grundlagen und physikalische Prinzipien des Fliegens

Um das oft stark vereinfachte Prinzip des Fliegens oberflächlich zu verstehen, sind die Erläuterungen einiger grundsätzlicher Effekte wichtig. Zwar erklären diese allein nicht zwingend das Fliegen, jedoch bilden sie einen Grundstein für das Verständnis dieser Arbeit.

2.1 Die Bernoulli Gleichung

Die Entstehung eines für den Auftrieb erforderlichen Druckunterschiedes kann mithilfe der Bernoulli-Gleichung erklärt werden.

Die Bernoulli-Gleichung, benannt nach dem Schweizer Mathematiker und Physiker Daniel Bernoulli, ist ein grundlegendes Prinzip der Fluid Mechanik und beschreibt die Konsequenzen der Energieerhaltung für Strömungen. Genauer formuliert Bernoulli einen Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und Druck mit der folgenden Bernoulli-Gleichung:

$$p + \frac{1}{2}\rho V_x^2 + \rho gh = \text{const.}$$

Die Gleichung besagt, dass der geodätische Druck ρgh , der dynamische Druck $\frac{1}{2}\rho V^2$ und der statische Druck p in der Summe konstant bleiben.

Betrachtet man nur den dynamischen und den statischen Druck, so wird durch die Formel $p + \frac{1}{2} * \rho * V^2 = \text{const.}$ deutlich, dass der Druck bei steigender Geschwindigkeit sinken muss, da bei vereinfacht angenommener gleichbleibender Dichte somit $p \sim V^2$ gilt.^{3/4/5/6/7}

2.2 Der Magnus-Effekt

Ein ebenso wichtiger Baustein zur Entstehung eines Auftriebs am Flügel ist eine Rotationsströmung, die durch den von Heinrich Magnus entdeckten Magnus Effekt sehr schön gezeigt werden kann.

Der Magnus Effekt wird oft durch eine Betrachtung eines Parallelluft umströmten Zylinders veranschaulicht.

³ (Wikipedia, 2023)

⁴ (SWR, kein Datum)

⁵ (Lernhelfer, kein Datum)

⁶ (Leifiphysik, kein Datum)

⁷ (Junglas, kein Datum)

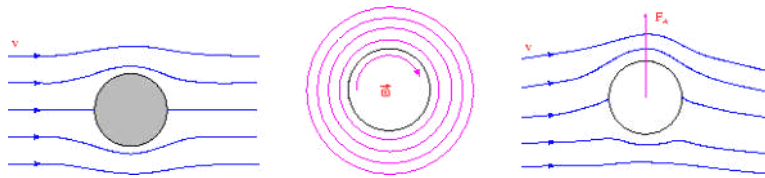


Abbildung 1

<https://pawm.physik.uni-wuerzburg.de/video2/alpha/FluidDynamik/img160.gif>, aufgerufen am 24.10.2023

Wie in dem Bild der Universität Würzburg dargestellt, beginnt der Zylinder mit der geraden, parallelen Umströmung zu rotieren und erzeugt aufgrund der Reibung der Luft eine kreisförmige Strömung in seiner Grenzschicht. Diese Überlagerung der beiden Strömungen führt zu einer Geschwindigkeitsdifferenz der oberen und unteren Strömung, da sich die oben überlagerte Strömungsgeschwindigkeit aufgrund ihrer gleichen Richtung addiert und die sich unten überlagerte und entgegen gerichtete Strömungsgeschwindigkeit subtrahiert. Somit lässt sich anhand der zuvor erklärten Bernoulli Gleichung eine durch die Geschwindigkeitsdifferenz verursachte Druckdifferenz erklären, die zu einer senkrecht zur Strömungsrichtung gerichteten Querkraft führt.^{8/9/10}

Ähnlich wie bei einem Zylinder führt eine Überlagerung der Parallelströmung und der Rotationsströmung um einen Tragflächenflügel, die anschließend erklärt wird, zu demselben Effekt.¹¹

2.3 Die Entstehung einer Querkraft

Reale Fluide üben einen Strömungswiderstand auf einen Körper aus, der durch Fluidreibung verursacht wird. Durch Gestaltung von Körpern, die von Strömungen umgeben sind, kann dieser Widerstand gegen die Strömung möglichst klein gegenüber dem Quertrieb, beziehungsweise der seitlichen Auftriebskraft gehalten werden. Diese strömungsgünstigen Körper werden als Tragflügel oder kurz als Flügel bezeichnet. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Strömungswiderstand jedoch vernachlässigt.¹²

Im Allgemeinen lässt sich die Entstehung der Auftriebskraft auf Tragflächen durch eine Zusammensetzung aus mehreren Effekten erklären. Zum einen durch den Bernoullieffekt, der einen Zusammenhang zwischen dem Druck und der Strömungsgeschwindigkeit angibt, und die Druckverteilung und Druckgradienten. Des Weiteren

⁸ (cosmos-direkt, kein Datum)

⁹ (Universität Göttingen, 2023)

¹⁰ (Thomas, Thomas-Flight-Test (Seite 3), 1992)

¹¹ (Sigloch, 4.2.9.1 Magnus-Effekt, 2021)

¹² (Sigloch, 4.3.3 Kräfte an Umströmten Tragflächen, 2021)

tragen insbesondere Wirbelbildungen und Zirkulation zu einem wichtigen Aspekt der Auftriebsbildung bei.¹³

Daher müssen Tragflügel in der Lage sein die Zirkulation zu erzeugen, die für die Auftriebskraft erforderlich ist.

Wirbel und Zirkulationsströmungen an der Hinterkante des Flügelprofils, die auf hohe Reynoldszahlen zurückzuschließen sind, tragen maßgeblich zu einer Auftriebskraft bei. So hat der Strömungsforscher Ludwig Prandtl festgestellt, dass eine reine Parallelströmung erst dann einen Auftrieb erzeugen kann, wenn eine Rotationsströmung überlagert wird. Er erkannte, dass bei einem Flügel, der von einem gleichmäßigen Luftstrom angeströmt wird, die Luft anfangs am stärksten die Hinterkante des Flügels umströmt, um einen Druckausgleich zum vorderen Staudruck an der sogenannten Nase herzustellen. Nimmt jedoch die Geschwindigkeit des Luftstroms zu, so kann die Luft die Hinterkante nicht mehr glatt umströmen. Infolgedessen entsteht ein Wirbel, der sich hinter dem Flügel bildet und stromabwärts zieht. Als ein Resultat der Drehimpulserhaltung wird eine gegenläufige Zirkulation zu dem sogenannten Anfahrtswirbel um den Flügel herum erzeugt. Die Überlagerung von Parallelströmung und dieser entstandenen Zirkulationsströmung ist wie beim Magnus Effekt Grund für die wirkende Querkraft.^{14/15/16/17/18/19}

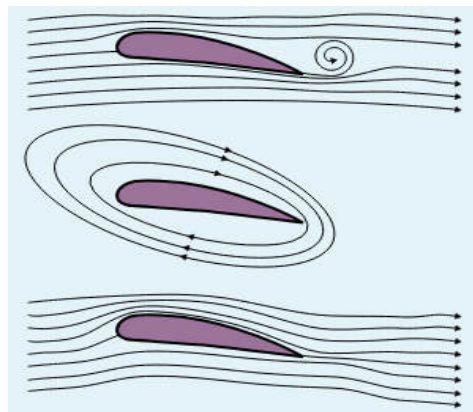


Abbildung 2

https://www.leifiphysik.de/sites/default/files/images/04efe23d80005ca253628cadad564803/992bio-nik_auftrieb_zirkulationsstroemung.svg, aufgerufen am 24.10.2023

¹³ (Leifiphysik, kein Datum)

¹⁴ (Leifiphysik, kein Datum)

¹⁵ (SWR, kein Datum)

¹⁶ (Thomas, Thomas-Flight-Test (Seite 4), 1992)

¹⁷ (Junglas, kein Datum)

¹⁸ (Sigloch, 4.2.9.2 Tragflügeltheorie, 2021)

¹⁹ (Universität Würzburg, kein Datum)

Mithilfe der Formel nach Kutta-Joukowsky kann der Auftrieb basierend auf der Überlagerung von der Zirkulationsstärke $\Gamma = \oint V ds$ und der Parallelströmungsgeschwindigkeit V , der Luftdichte ρ und der Tiefe b des Flügelprofils berechnet werden:

$$F_A = \rho * b * V * \Gamma^{20/21/22/23}$$

Dabei ist es essenziell, dass Flügelprofile eine scharfe Hinterkante besitzen, die die Luft an dieser Stelle reibungslos nach der sogenannten Kuttaabflussbedingung abströmt.^{24/25}

Darüber hinaus kann mithilfe der Druckverteilung während der Umströmung argumentiert werden. So entsteht durch die Trennung der Stromlinien an der Nase ein Überdruck, der einen Staudruck an der Nase des Profils bildet (vgl. in Abbildung 3 in roter Farbe dargestellt).²⁶

Das hat zur Folge, dass bei Beginn der konvexen Krümmung an der Oberseite (Leeseite) ein Unterdruck entsteht (vgl. in Abbildung 3 in blauer Farbe dargestellt). Dies geschieht aufgrund der Gesetzmäßigkeit, dass sich der Druck im Unendlichen dem Umgebungsdruck angleichen muss. Das bedeutet, dass ein Unterdruck an der Oberfläche der konvexen Krümmung existieren muss.^{27/28}



Abbildung 3

https://cae-sim-sol.com/wp-content/uploads/2021/03/sport_trag4-300x133.jpg, aufgerufen am 24.10.2023

Zusätzlich besitzt, wie im vorherigen Absatz erklärt, ein Flügelprofil eine Zirkulationsströmung, die nach dem Magnus Effekt eine Geschwindigkeitsdifferenz zur Folge hat.

²⁰ (Sigloch, 4.2.9.2 Tragflügeltheorie, 2021)

²¹ (Junglas, kein Datum)

²² (Universität Würzburg, kein Datum)

²³ (Cosmos Indirekt, kein Datum)

²⁴ (Sigloch, 4.2.9.2 Tragflügeltheorie, 2021)

²⁵ (Thomas, Thomas-Flight-Test (Seite 4), 1992)

²⁶ (Sigloch, 4.3.3.5 Druckverteilung am Tragflügel, 2021)

²⁷ (Sigloch, 4.3.3.5 Druckverteilung am Tragflügel, 2021)

²⁸ (Matzdorf, 2022)

Infolgedessen lässt sich durch Bernoulli die Aussage treffen, dass an der Leeseite ein zusätzlicher Unterdruck und an der Profilunterseite (Luvseite) ein Überdruck herrscht, der jedoch nur etwa $\frac{1}{3}$ zum gesamten Auftrieb beiträgt.²⁹

2.4 Zusammenhang zwischen Anstellwinkel und Auftrieb

Allgemein ist mit dem Anstellwinkel der Tragfläche die sogenannte Profillehne, bzw. -länge gemeint, die in einem Winkel α zur Anströmrichtung geneigt ist. Dieser Winkel, der in der Kutta-Joukowski Formel nicht berücksichtigt wird, kann den Auftrieb positiv wie negativ beeinflussen.

Die immer wieder aufgeführte Formel

$$F_A = c_A \frac{\rho}{2} V^2 A_{FL},$$

zeigt einen Beiwert c_A , der von der Reynoldszahl, der Oberflächenrauigkeit, dem Tragflügelprofil und dem Anstellwinkel abhängt. Ein experimentell fundierter Graph, der die Abhängigkeit zwischen Winkel und Auftriebsbeiwert c_A zeigt, demonstriert einen sogenannten Strömungsabriss bei ca. 20° .^{30/31}

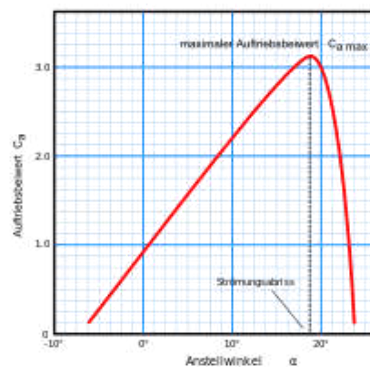


Abbildung 4

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/af/Auftriebsbeiwert.svg/1024px-Auftriebsbeiwert.svg.png>; aufgerufen am 26.10.2023

So lässt sich sagen, dass der Anstellwinkel den Auftrieb bis zu einem gewissen Grad steigen lässt, bis der Strömungsabriss einsetzt und ein zu geringer Druck an der Oberseite entsteht und sich die Grenzschicht löst.

²⁹ (Neureiter, 2020)

³⁰ (Junglas, kein Datum)

³¹ (Super User, 2020)

3. Experimenteller Aufbau

3.1 Bearbeitung und Aufbau der beiden Windkanäle

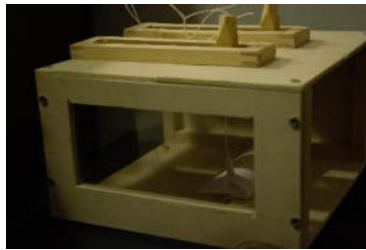


Abbildung 5

Der erste Windkanal, der hauptsächlich aus Holz und Plexiglas gebaut wurde, hatte einen Papierflügel zwischen zwei Führungsseilen gespannt, die durch 2 Schienen den Anstellwinkel des Flügels verändern konnten. Mithilfe eines Föhns als Luftstromquelle konnte zwar ein Auftrieb beobachtet werden, jedoch gab es Probleme mit der Messbarkeit des Auftriebs und der Erzeugung einer gleichmäßigen Strömung.³²



Abbildung 6

Um diese Probleme zu lösen, wurde ein verbesserter Windkanal gebaut, der durch seine erheblich größere Länge in drei Kammern unterteilt wurde. Dabei hatte sowohl die erste als auch die zweite Kammer die Funktion Luft in die Form des Kanals zu drücken bzw. wieder auszutreten lassen. Zur Entwicklung eines halbwegs laminaren Luftstroms wurden Strohhalme längs am Trichter angebracht. In der zweigeteilten Mess- und Beobachtungskammer wurde mit Hilfe des Stechbeitels eine Führung für die Montierung des Flügelprofils in die Decke der Messkammer gestochen, in der die Daten anhand einer mit der Montierung verklebten Waage erhoben werden konnten. Um weitere Störungen zu verhindern wurde der gesamte Windkanal mit Heißkleber und Klebeband abgedichtet und die Beobachtungskammer lackiert. Außerdem wurde zur Beobachtung der Strömungen eine Plexiglasscheibe in die Beobachtungskammer integriert.³³

³² (Neureiter, unipub.uni-graz, 2020)

³³ (Cartegni)

Ursprünglich sollte ein Staubsauger als Strömungsquelle dienen, um die Luft gleichmäßiger und laminarer aus dem Windkanal zu ziehen. Trotz der Nachteile des Drückens der Luft in den Windkanal wurde statt dem Staubsauger ein Ventilator verwendet, da die Staubsaugerleistung leider zu gering für eine Messung des Auftriebs war.

Bei der Bearbeitung wurden die Trichterteile, um Gewicht zu reduzieren, aus Schaumstoffplatten in die jeweilige Trapezform geschnitten und mit Schraubzwingen im rechten Winkel an den Öffnungen zusammengeklebt. Der restliche Teil des 2. Windkanals und der gesamte 1. Windkanal wurde aus einem vorher geschraubten Gerüst und zugeschnittenen Sperrholzplatten zusammengesetzt. Einzelne speziellere Elemente wie beispielsweise die Schiene des ersten Windkanals wurde mit einer sogenannten Scherzapfenverbindung gebaut.

3.2 Auswahl und Herstellung der prototypischen Tragflächen

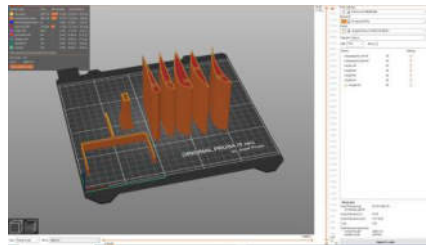


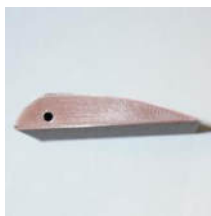
Abbildung 7

Um die Unfertigkeiten der Papiertragflächen im ersten Windkanal zu umgehen, wurden die neuen Tragflächenprofile mit einem 3D Drucker, einem Original Prusa i3 MK3S & MK 3S+ Drucker, mit einem Prusament PLA braunem Filament wabenartig gedruckt. Als Vorlage für die Tragflächen diente ebenso wie für den Windtunnel eine Experimentbeschreibung des bedeutenden Maschinenbauers Alessandro Cartegni. Zusätzlich zu den 3 Tragflächen wurden weitere Tragflächen und die Montierung nach diesem Prinzip angefertigt.³⁴

Profil A:



Profil B:



Profil C:



³⁴ (Cartegni)

4. Durchführung des Experiments

4.1 Beschreibung des Experimentablaufs

Im Wesentlichen besteht die Aufgabe des Experimentes aus mehreren Zielen: die Visualisierung der Strömung und die Messung des Auftriebs in Gramm an drei verschiedenen Tragflächenprofilen unter ebenso fünf verschiedene Anstellwinkel.

Um die Strömung um einen Tragflügel zu visualisieren, wurde anstelle des Ventilators eine Nebelmaschine an den Eingangstrichter angeschlossen. Da sich jedoch hierbei der Nebel in dem Kanal staute wurde mithilfe eines Föhns eine leichte Strömung erzeugt, die durch die Strohhalm einigermmaßen geglättet wurde. Dabei wurde, um die Geschwindigkeitsdifferenz und den Anfahrtswirbel zu betrachten immer nur kurz Nebel in den Kanal gepustet und vom Föhn beschleunigt. Um jedoch die Zirkulation um die Tragfläche zu betrachten, musste mit dem Föhn und der Nebelmaschine etwas länger eine konstante Strömung um die Tragfläche erzeugt werden. All diese Prozesse wurden durch eine farbige Beleuchtung des Nebels sichtbar und wurden fotografisch durch die Plexiglasscheibe festgehalten.

Um daraufhin den Auftrieb zu messen, musste der jeweilige Flügel zuerst auf den jeweiligen Angriffswinkel von 0° ; 10° ; 20° ; 30° ; 40° an die Montierung geschraubt werden und die unten angeklebte Waage auf null zurückgesetzt werden, um einen neutralen Wert zu haben, an dem man die unterschiedlich schweren Flügel vergleichen konnte. Daraufhin wurde der angeschlossene Ventilator mit der Stufe 1 angeschaltet und der negative Wert an der Waage wurde im Betrag in Excel dokumentiert.

Um weiter einen Überblick über die in der Theorie besprochenen erforderlichen Parameter für einen Auftrieb zu erforschen, wurde anhand der Tragflügel A, B, und C der Parameter Geschwindigkeit um weitere zwei Stufen ergänzt und der daraus abgelesene Auftriebswert in einer Exceltabelle ermittelt.

Die Messungen wurden je Flügel, Winkel und Geschwindigkeit fünfmal wiederholt, aus welchen sich daraufhin die Mittelwerte ermitteln ließen.

4.2 Erwartungen an die Ergebnisse und Hypothesen

Ausgehend der in Kapitel 2 erläuterten physikalischen Voraussetzungen für das Fliegen lassen sich einige Hypothesen und Erwartungen hinsichtlich der Strömungsbeobachtung und der Messungen der Zusammenhänge von Auftrieb und Anstellwinkel bzw. Geschwindigkeit formulieren.

Vorerst lassen sich bei der Strömungsbeobachtung mit der Nebelmaschine, die in Abschnitt 2.2 und 2.3 erläuterten Strömungsbilder, wie die Geschwindigkeitsdifferenz der Luftströmung an der Oberseite bzw. Unterseite, der Anfahrtswirbel an der scharfen Hinterkante und als Gegenimpuls die Rotationsströmung um den Tragflügel erwarten. Außerdem lässt sich eine Beobachtung der deutlichen Trennung der Luft an der vorderen runden Nase erhoffen.

Bei der Formulierung der Hypothesen zur Messung des Zusammenhangs von Auftrieb und Anstellwinkel sollten die physikalischen Gesetzmäßigkeiten aus dem Abschnitt 2.4 herangeführt werden. Daraus lässt sich für die Datenerhebung prognostizieren, dass der Auftrieb bis zu ca. 20° Anstellwinkel ansteigt, da sich aus dem c_A -Winkel-Diagramm in Abschnitt 2.4 herauslesen lässt, dass der Auftriebsbeiwert mit einem steigenden Anstellwinkel bis zu dem Wendepunkt bei 20° steigt und dann stark absinkt. Somit muss der Auftrieb unter der Voraussetzung, dass kein anderer Parameter verändert wird, bis zu 20° Anstellwinkel steigen und dann fallen, da sich mit der Formel $F_A = c_A \frac{\rho}{2} V^2 A_{Fl}$ aus dem Abschnitt 2.4 unter der vorher genannten Voraussetzung der proportionale Zusammenhang $F_A \sim c_A$ schließen lässt.

Weitere Prognosen für die Messung am ebenso untersuchten Zusammenhang von Auftrieb und Geschwindigkeit lassen sich mit der Formel für die Auftriebskraft herbeiführen. Es werden im Abschnitt 2.3 und 2.4 Formeln für den Auftrieb genannt, die beide die Geschwindigkeit V berücksichtigen. Die Formel $F_A = \rho b \Gamma V$ von Kutta-Joukowski nimmt V in die erste Potenz und lässt vorerst einen linearen Zusammenhang vermuten. Jedoch führt die in Abschnitt 2.4 besprochene Formel $F_A = c_A \frac{\rho}{2} V^2 A_{Fl}$ einen exponentiellen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Auftrieb heran, der durch die 2. Potenz begründet ist. Durch Überprüfung der restlich herangeführten Parameter der Formeln auf mögliche Variablen bei der Veränderung der Geschwindigkeit lässt sich herausfinden welche Formel den Zusammenhang wiedergibt. So sind die in der ersten Formel genannten Parameter wie Tiefe b und Dichte ρ bei Veränderung der Geschwindigkeit Konstanten, da sowohl die Dichte der Luft als auch die Tiefe des Flügels nicht durch ein verändertes V beeinflusst werden. Jedoch der in der Kutta-Joukowski Formel aufgeführte Parameter Zirkulation Γ wird durch die Geschwindigkeit beeinflusst, da die Zirkulation um den Tragflügel durch $\oint V ds$ errechnet wird und somit eine veränderte Geschwindigkeit die Zirkulation verändert, womit Γ keine Konstante ist, sondern eine Variable in dieser Untersuchung. Damit lässt sich mit der Kutta-Joukowski Formel keine Aussage über den Zusammenhang treffen. Untersucht man jedoch die zweite Formel $F_A = c_A \frac{\rho}{2} V^2 A_{Fl}$ so fällt auf, dass sowohl die Dichte ρ ,

die Querschnittsfläche A_{FL} des Tragflügels als auch der Auftriebsbeiwert c_A , der durch den Anstellwinkel und den Eigenschaften des Flügelprofils definiert wird, bei Veränderung der Geschwindigkeit konstant bleiben. Daraus lässt sich der proportionale Zusammenhang $F_A \sim V^2$ formulieren, der einen exponentiellen Zusammenhang vermuten lässt.

4.3 Beobachtung der Auftriebskraft und Umströmung

Zur ersten Beobachtung und Erfassung des Auftriebs diente der erste Windkanal und lieferte einen ersten Eindruck über das Phänomen des Auftriebs an einem Tragflügel.



1. Video.pdf

Der geführte Papiertragflügel erfuhr bei Erfassung der Luftströmung durch den Föhn eine Kraft, die senkrecht zur Anströmrichtung erfolgte.

Um daraufhin genauere Beobachtungen zu machen, wurde im zweiten Windkanal die Luftströmung mittels Nebelmaschine visualisiert und festgehalten. So konnten die in der Theorie beschriebenen Strömungseigenschaften verglichen werden.



2. Video.pdf



3. Video.pdf

Deutlich wird eine Bildung eines Wirbels an der scharfen Hinterkante, der sich löst und nicht mehr erkennbar ist. (Video 2)

Außerdem lässt der Nebel erkennen, dass die Luft, die sich an der vorderen Wölbung gespalten hatte, an der Oberseite der Tragfläche leicht versetzt zur Luft unterhalb früher an der scharfen Hinterkante ankommt. (Video 1)

Es ist jedoch schwierig zu erkennen, dass kurz nach dem Einsetzen der Slow Motion eine Zirkulation um den Tragflügel beginnt, was in der analogen Betrachtung weitaus besser zu erkennen ist. (Video 1)

4.4 Datenerfassung und Diagramme

Das Ziel der Arbeit bestand neben der Visualisierung der für den Auftrieb erforderlichen Strömungen auch darin anhand des Experimentes Messungen zu tätigen, die einen Zusammenhang zwischen dem Auftrieb und für dessen wichtige Parameter physikalisch darlegen.

So ergaben sich für den Zusammenhang Winkel [°] und Auftriebskraft F_A [gr] bei gleichbleibender Geschwindigkeit auf Stufe 1 (V1) und den Zusammenhang Auftrieb [gr] - Geschwindigkeit V bei ebenso gleichbleibendem Anstellwinkel von 0° für drei unterschiedliche Flügelprofile folgende Werte und dazugehörige Graphen:

Flügelprofil A:


Tragflügel A	Parameter	1.MR	2.MR	3.MR	4.MR	5.MR	∅
	Zusammenhang Winkel [°] -Auftrieb F [gr]						
	0°	2,3	1,4	1,3	1,5	1	1,5
	10°	10	8,7	10,3	11,3	9,1	9,88
	20°	15,8	14,3	14	13,4	14,4	14,38
	30°	17,2	15,6	14,6	14,2	14,8	15,28
	40°	22,6	20,5	20,1	20	19,7	20,58
	Zusammenhang Geschwindigkeit [V] -Auftrieb F [gr]						
	V 1 (langsam):	2	2,1	1,8	2,5	2,6	2,2
	V 2 (Mittel):	3,6	3,5	3,5	3,5	3,7	3,56
	V 3 (schnell):	4,9	5	5	4,7	4,6	4,84

Tabelle 1

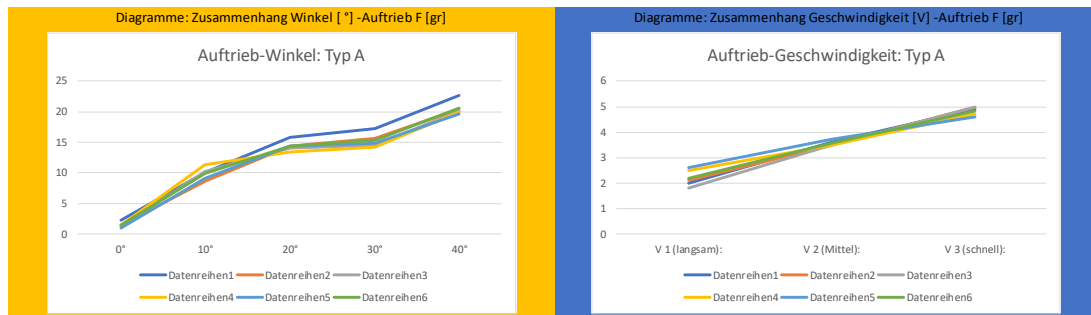


Abbildung 8

Flügelprofil B:


Tragflügel B	Parameter	1.MR	2.MR	3.MR	4.MR	5.MR	∅
	Zusammenhang Winkel [°] -Auftrieb F [gr]						
	0°	4,7	4,8	4,8	4,9	4,6	4,76
	10°	11,7	10	10,3	10,5	10,6	10,62
	20°	13,9	12,9	13,2	13	13,3	13,26
	30°	17,3	16,8	16,5	15,8	16,2	16,52
	40°	19,7	18,8	18,9	17,8	18,3	18,7
	Zusammenhang Geschwindigkeit [V] -Auftrieb F [gr]						
	V 1 (langsam):	4,4	4,5	4,3	4,4	4,3	4,38
	V 2 (Mittel):	6,7	6,9	7	7,5	7,2	7,06
	V 3 (schnell):	10	10,4	10,3	10	10,1	10,16

Tabelle 2

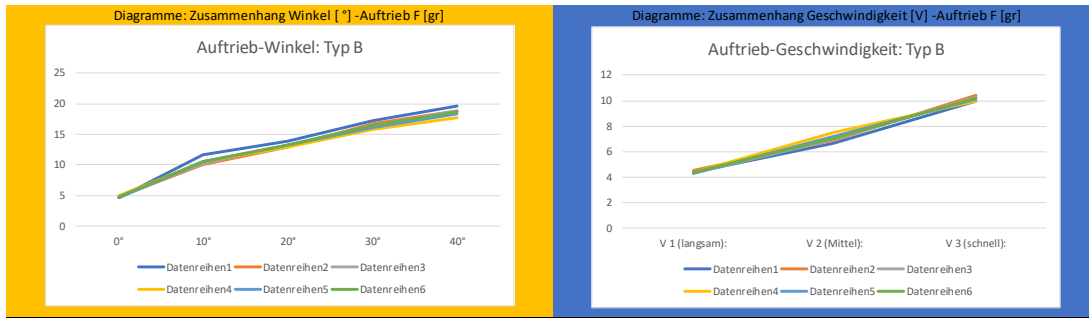


Abbildung 9

Flügelprofil C:


Tragflügel C	Parameter	1.MR	2.MR	3.MR	4.MR	5.MR	Ø
	Zusammenhang Winkel [°] -Auftrieb F [gr]						
	0°	5,4	4,5	4,9	6	4,6	5,08
	10°	12,5	12,4	12,6	12,4	12,7	12,52
	20°	9,3	14,8	15,2	15,3	15,2	15,125
	30°	18,2	17,4	17,2	16,2	16,9	17,18
	40°	12,4	10,9	10,5	14,4	12,7	12,18
	Zusammenhang Geschwindigkeit [V] -Auftrieb F [gr]						
V 1 (langsam):	5,9	6,1	5,8	5,2	4,8	5,56	
V 2 (Mittel):	7,2	7,8	7,7	7,9	7,9	7,7	
V 3 (schnell):	12	12,1	11,8	11,9	12,2	12	

Tabelle 3

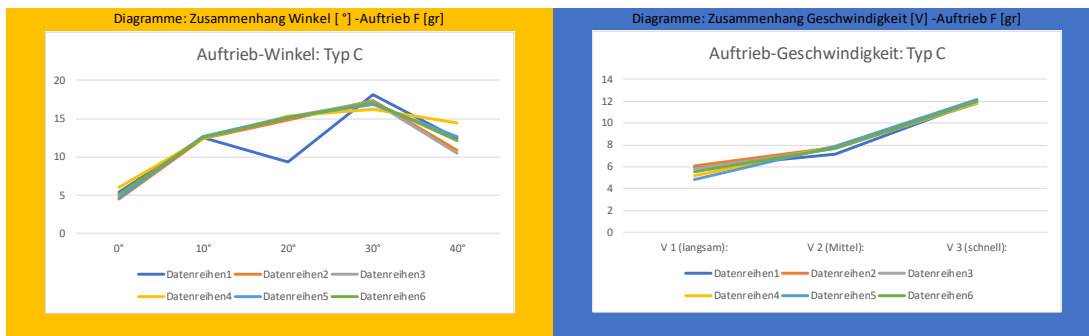


Abbildung 10

Für die Ermittlung des wirkungsvollsten Flügels wurden zusätzlich zu den jeweiligen Zusammenhängen und Flügeltypen die Durchschnittswerte zusammengefasst und in zwei Diagrammen dargestellt.

Zusammenhang Winkel [°] - Auftrieb F [gr] bei Geschwindigkeit auf Stufe 1:

Zusammenhang Winkel [°] -Auftrieb F [gr]			
Winkel	A	B	C
0°	1,5	4,76	5,08
10°	9,88	10,62	12,52
20°	14,38	13,26	15,125
30°	15,28	16,52	17,18
40°	20,58	18,7	12,18

Tabelle 4

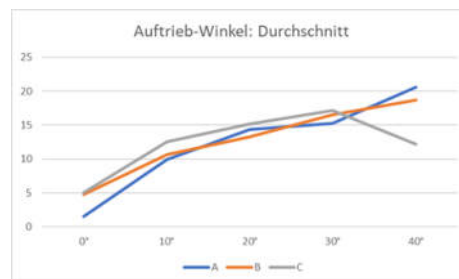


Abbildung 11

Zusammenhang Geschwindigkeit [V] - Auftrieb F [gr] bei einem Anstellwinkel von 0°:

Zusammenhang Geschwindigkeit [V] -Auftrieb F [gr]			
Geschwindigkeit	A	B	C
V 1 (langsam):	2,2	4,38	5,56
V 2 (Mittel):	3,56	7,06	7,7
V 3 (schnell):	4,84	10,16	12

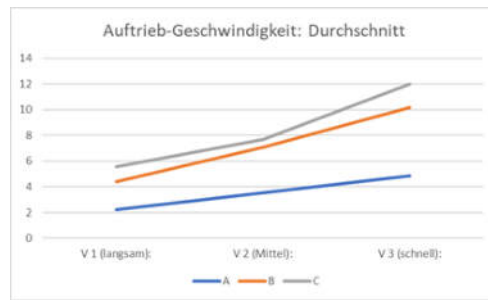


Tabelle 5

Abbildung 12

5. Diskussion der Ergebnisse

5.1 Vergleich der Umströmungsbeobachtung mit der Theorie

Die in Abschnitt 2.3 besprochenen Strömungseigenschaften um eine Tragfläche umschließen einen Anfahrtswirbel, eine Geschwindigkeitsdifferenz der Luft an der Ober- und Unterseite und eine Rotationsströmung um den Flügel, die ausschlaggebend für den Auftrieb sind.

Mittels Nebel, wie in Abschnitt 4.3 sichtbar sollten, diese Strömungseigenschaften an dem wirkungsvollsten Tragflügel C kenntlich gemacht werden.

So wurde deutlich der Anfahrtswirbel kenntlich, der sich mit der Zeit von der Hinterkante des Flügels löste.



Abbildung 13

Außerdem konnte in dem Experiment nachgewiesen werden, dass tatsächlich die Geschwindigkeit oberhalb des Flügels zwar schneller ist, sich die Geschwindigkeit ober- und unterhalb jedoch nicht exakt treffen.

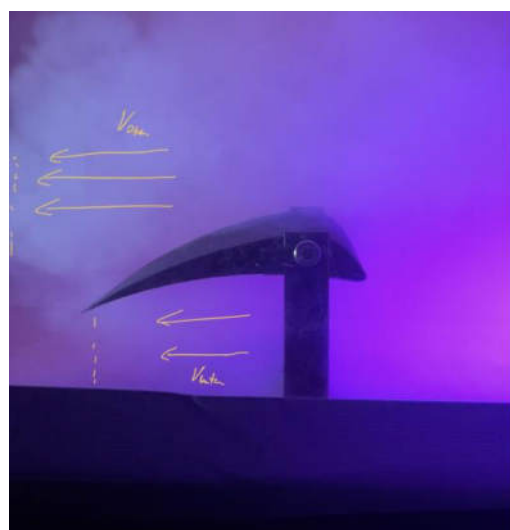


Abbildung 14

Der obere Luftstrom kommt versetzt vor dem unteren an, was durch den in 2.2 besprochenen Magnus Effekt begründet werden kann. Der zuvor beobachtete Anfahrtswirbel bewirkt aufgrund der Drehimpulserhaltung einen Gegenwirbel, der um die Tragfläche rotiert und somit den oberen Luftstrom verstärkt und den unteren Luftstrom abbremst. Somit entsteht eine Geschwindigkeitsdifferenz, die nach Bernoulli zu einer Druckdifferenz führt und einen Sog verursacht. Somit kann durch die Strömungsbeobachtung mithilfe der Theorie Rückschlüsse auf die Auftriebskraft gezogen werden.

Leider konnte der erforderliche Rotationswirbel nur schwach erkennbar gemacht werden. Jedoch erkennt man nach dem Lösen des großen Anfahrtswirbels eine leichte Rotationsströmung, da sich der Gegenwirbel nicht löst.



4. Video.pdf

6.2 Allgemeiner Vergleich der Daten unter den Flügelprofilen

Betrachtet man die Durchschnittswerte der drei Flügelprofile, so lässt sich eine eindeutige Aussage treffen, welches das wirkungsvollste Flügelprofil ist. Anhand dieser Erkenntnis und den Formunterschieden lassen sich begünstigte Formmerkmale herausfinden.

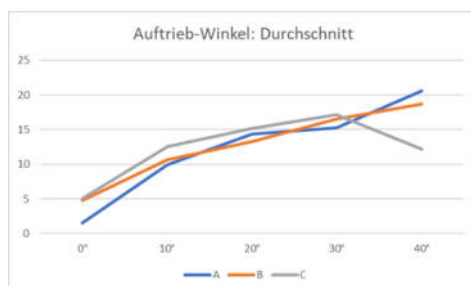


Abbildung 15

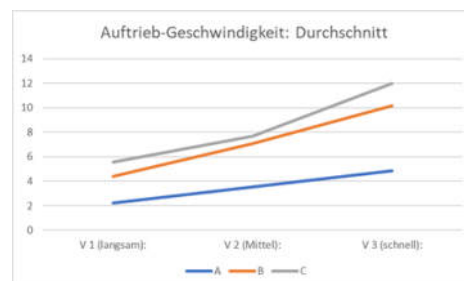


Abbildung 16

Beide Diagramme lassen erkennen, dass der Tragflügeltyp C den höchsten Auftriebswert liefert und A im Durchschnitt die niedrigsten Werte liefert. Insbesondere lässt sich diese Hierarchie markant aus dem Diagramm „Auftrieb-Geschwindigkeit: Durchschnitt“ herauslesen.

Einige Ausnahmen jedoch liefert das Diagramm „Auftrieb-Winkel: Durchschnitt“. Bei 0°; 10° und 30° entsprechen die Messwerte der zuvor geäußerten Hierarchie. Bei 20° jedoch tauschen Typ B und A die Plätze, was möglicherweise durch eine Reibungszunahme in der Führung der Montierung, die in Abschnitt 5.4 noch weiter erläutert wird, bei der Versuchsreihe 20° des Flügeltyps B begründet werden kann. Weiterhin

wechseln Typ A und C bei 40° ebenfalls die Hierarchie, was in Abschnitt 5.3 näher erläutert wird.

Abgesehen von diesen Ausnahmen lässt sich anhand der im Vergleich zum Profil A größeren, runden Nase der Profile B und C, die die Luft bei der Anströmung trennt, sagen, dass eine stumpfere, abgerundete Nase den Auftrieb positiv beeinflusst. Des Weiteren lässt sich durch den Unterschied, dass das Profil C eine konkave Unterseite und damit eine schärfer zulaufende Hinterkante hat, schlussfolgern, dass ebenso eine nach innen gekrümmte Unterseite und eine schärfere Hinterkante den Auftrieb zusätzlich positiv beeinflussen.

5.3 Vergleich und Interpretation der Datenerfassung zum Zusammenhang F_A zum Winkel

Vergleicht man die im Experiment ermittelten Graphen der Zusammenhänge zwischen Winkel und Auftriebskraft mit der Theorie so fällt auf, dass die in Abschnitt 4.2 formulierten Erwartungen nicht eingetreten sind.

Aufgrund des in Abschnitt 2.4 besprochenen c_A -Anstellwinkel Diagramms und dem darauf erkenntlichen Strömungsabriss wurde vermutet, dass ab 20° Anstellwinkel der Auftrieb sinkt. Warum dies nicht auf den Diagrammen erkenntlich ist, wird im Folgenden anhand der Diagramme der Profile erläutert.

Typ A:

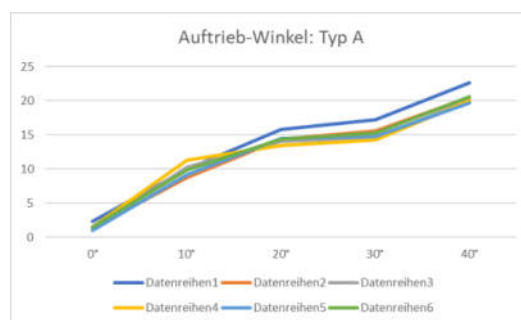


Abbildung 17

Von 0° bis 20° Anstellwinkel steigt der Auftriebswert mit einem kleinen Knick bei 10° an, was an dem bis ca. 19° Anstellwinkel steigenden c_A -Wert liegt, der durch die Änderung keines anderen Parameters direkt proportional zu der Auftriebskraft ist. Im Folgenden müsste also erwartet werden, dass der Auftriebswert aufgrund des Strömungsabrisses drastisch sinken müsste. Jedoch bleibt der Wert der Auftriebskraft bis zu 30° in etwa gleich und steigt dann bis 40° stark an. Eine mögliche Begründung für den Anstieg bei 40° ist, dass der Flügel bei einem solch großen Winkel durch die

starke Anströmung der Luft, die auf den Flügel drückt, wie ein Segel funktioniert und in Richtung der Strömung auf die Führung gedrückt wird. Dadurch entsteht ein Staudruck bzw. ein lokaler Überdruck an der strömungszugeneigten Seite des Flügels. Somit entsteht eine Kraft $F_{St} = A * p$ in Richtung des Umgebungsdrucks, der senkrecht zur Profelsehne und nicht wie beim Auftrieb senkrecht zur Anströmrichtung wirkt. Die durch den Staudruck entstandene Kraft teilt sich in eine vertikale und horizontale Richtung auf, die zusammen ein Kräfteparallelogramm bilden, das durch seine Vertikale einen vermeintlichen Auftrieb messen lässt und zugleich durch seine horizontale Kraft ein Kippmoment in der Führung verursacht und eine Messungenauigkeit auf der Waage verursacht. Durch dieses Kippmoment lässt sich somit auch keine Aussage mehr über einen Messwert treffen, der nur eine Vertikale bzw. eine senkrecht zur Anströmrichtung wirkende Kraft messen soll.

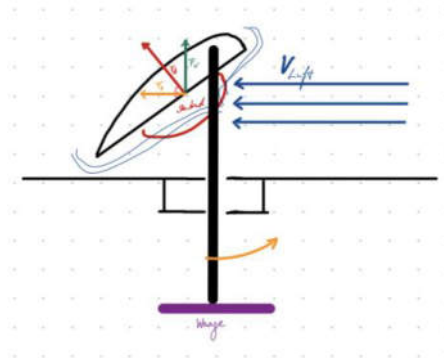


Abbildung 18

Durch die nicht geschwungene, rechteckige Unterseitenform dieses Profils ist der scheinbare Auftriebswert insbesondere bei diesem Profil markant, da keine geschwungene Unterseite hat, die die Luft besser ableitet.

Typ B:

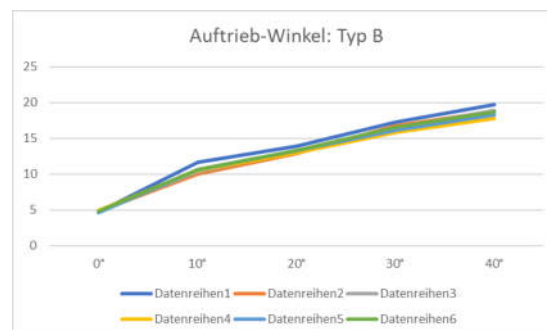


Abbildung 19

Der Graph für das Diagramm steigt durchgehend an, wobei er im Intervall von 0° bis 10° die höchste Steigung besitzt und dann leicht abflacht, jedoch weiterhin ansteigt.

Somit verhält sich der Graph ebenso wie der des Profils A bis 20° gemäß der Theorie, da der Strömungsabriss laut der Theorie bereits vor den 20° eintritt, jedoch der Auftriebsbeiwert weiterhin auf einem hohen Wert ist. Weiterhin ist eine mögliche Erklärung des widersprüchlichen Verlaufs des Graphen nach den 20°, die gleiche, die bereits für den Flügeltyp A aufgeführt wurde. Der weitere Verlauf des Graphen gleicht sich dem des Flügelprofils A an was sich durch Überschneidungen der Durchschnittsgraphen kenntlich macht, da beide die gleiche Unterseitenform haben und somit einen gleichen Staudruck verursachen.

Typ C:

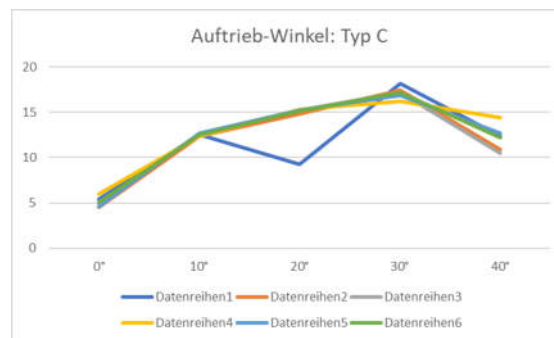


Abbildung 20

Der Graph des Flügeltyps verläuft ähnlich den beiden vorherigen Profilen bis ca. 20° nach den Gesetzmäßigkeiten der Theorie. Ab 30° bzw. 40° jedoch unterscheidet er sich von den anderen markant durch eine geringere Staudruckkraft, die einen scheinbaren Auftriebswert auf der Waage verursacht. Durch die konkav gekrümmte, der Strömungsrichtung zugeneigte Unterseite kann die Luft besser abgelenkt werden und es kann sich nicht ein derartig starker Stau- bzw. Überdruck bilden. Eine weitere Auffälligkeit besitzt der Messwert der 1. Datenreihe bei 20° Anstellwinkel. Dieser Messwert hat einen wesentlich kleineren Auftriebswert als die darauffolgenden vier Messwerte. Dies kann durch eine ungünstige Stellung der Montierung in der Führung begründet werden, da damit die Materialreibung, die im kommenden Abschnitt 5.4 behandelt wird, den Auftriebswert hemmt.

5.4 Vergleich und Interpretation der Datenerfassung zum Zusammenhang F_A -Geschwindigkeit

Die Erwartung, dass bei Untersuchung der Auswirkung einer steigenden Geschwindigkeit auf den Auftrieb ein parabelförmiges Wachstum des Auftriebs erkenntlich wird, wurde durch die eigens angesetzten Messungen enttäuscht.

Im Allgemeinen setzt sich die eigens gemessene Auftriebskraft im Windkanal aufgrund der Reibung in der Führung der Montierung aus der wirkenden Auftriebskraft F_A und der entgegengerichteten Gleitreibungskraft F_R zusammen.

Somit ist $F_{gemessen} = F_A - F_R$

Warum die jeweiligen Graphen jedoch mehr oder weniger von der Proportionalität $F_A \sim V^2$ abweichen wird im Folgenden anhand der Graphen erklärt.

Typ A:

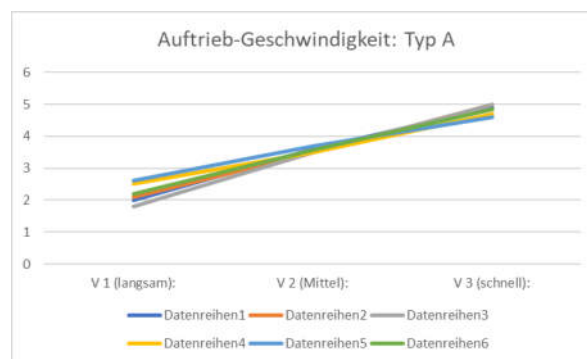


Abbildung 21

Bei Betrachtung der Graphen lässt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Auftrieb und Geschwindigkeit erkennen. Somit muss es eine Kraft geben, die mit steigender Geschwindigkeit den Messwert der Auftriebskraft hemmt, sodass aus einem eigentlich exponentiellen Zusammenhang 2. Grades ein linearer Zusammenhang entsteht. Die oben aufgeführte Reibungskraft in der Führung der Montierung liefert eine solche Kraft, die entgegen der Auftriebskraft wirkt und somit das Messergebnis verfälscht. Allgemein setzt sich die Reibungskraft $F_R = \mu * F_N$ aus dem Reibungskoeffizienten und der Normalkraft zusammen³⁵. Dabei ist die Normalkraft die Kraft, die senkrecht zur nach unten wirkenden Reibungskraft wirkt. Im Fall des Experimentes ist das die Anströmkraft bzw. Staudruckkraft $F_{St} = A_M * p$, wobei nach Bernoulli gilt, $p = \frac{\rho * V^2}{2} = const..$ Damit gilt $F_R = \mu * A_M * \frac{\rho * V^2}{2}$, wobei $\frac{\mu * A_M * \rho}{2} = const.$ ist und somit $F_R \sim V^2$ gilt. Die Montierung wird also mit steigender Geschwindigkeit exponentiell stärker gegen die Führung gedrückt, was dazu führen kann, dass der gemessene Auftrieb trotz Zunahme der Geschwindigkeit immer stärker gehemmt wird. Insbesondere das Profil A ist wie in Abschnitt 5.2 besprochen das Profil mit der ungünstigsten Form, was zu einem geringen Auftrieb führt.

³⁵ (Maschinenbau-Wissen, kein Datum)

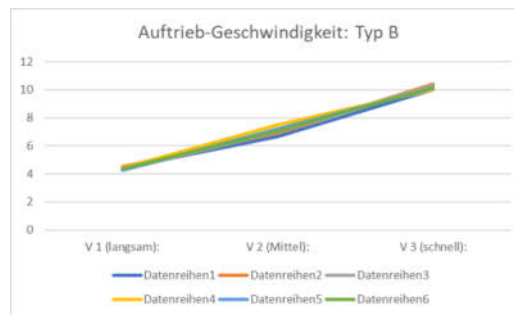
Typ B:

Abbildung 22

Ebenso wie bei dem Diagramm des Profils A wird der Auftrieb bei Profil B mit steigender Geschwindigkeit durch die Reibungskraft gehemmt. Zugute jedoch kommt dem Profil B ein besserer c_A -Wert und eine durch die rundere Nase größere Fläche im Vergleich zum Profil A. Dadurch ist der eigentliche Auftriebswert größer und wird durch die Reibungskraft weniger beeinflusst, was in dem Diagramm durch einen leichten Anstieg der Steigung im Intervall V2 bis V3 gegenüber der Steigung im Intervall V1 bis V2 bekräftigt wird.

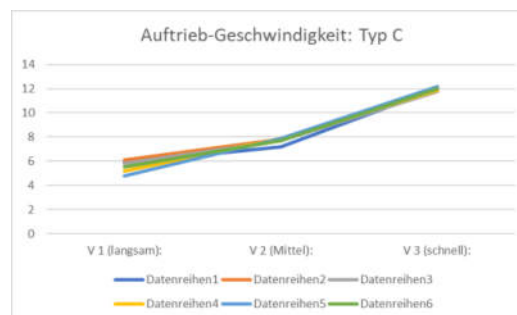
Typ C:

Abbildung 23

Anders als bei den beiden Profile A und B besitzen die Graphen des Diagramms „Auftrieb-Geschwindigkeit: Typ C“ einen eindeutig exponentiellen Verlauf, wie er eigentlich erwartet wurde. Trotzdem erkennt man ebenso wie bei den anderen Diagrammen des Zusammenhangs, dass der Messwert zunehmend mit der Geschwindigkeit gehemmt wird, da die Steigung bei einer 2. Potenz normalerweise wesentlich steiler verlaufen müsste. Dies ist, gleich den anderen Erklärungen, mit der zunehmenden Reibungskraft zu begründen. Die Form des Tragflügels begünstigt den Auftrieb mit dem c_A -Wert jedoch so stark, dass somit die exponentielle Charakteristik des Zusammenhangs Geschwindigkeit-Auftrieb hier stärker zum Vorschein kommt als bei den anderen Profilen.

6. Fazit

6.1 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass trotz all der Störfaktoren bei der Datenerhebung erkennbar wurde, dass die Gültigkeit des Experiments Bestand hat. Dies ist insbesondere durch die Wiederholbarkeit und Zuverlässigkeit der Messergebnisse begründet, was sich an den nahe beieinander liegenden Messergebnissen bei Wiederholungen erkennen lässt. Jedoch wurden Messergebnisse, bedingt durch das Prinzip des experimentellen Aufbaus, verfälscht, wodurch einige Daten nicht repräsentativ für die besprochene Theorie sind.

Ogleich den Störungen konnten insbesondere anhand des Flügels C Zusammenhänge deutlich gemacht werden. So konnten Strömungseigenschaften visualisiert werden. Die Zusammenhänge von Auftrieb und Anstellwinkel und Auftrieb und Geschwindigkeit konnten anhand von Diagrammen unter Berücksichtigung der Störfaktoren kenntlich gemacht werden und mit der Theorie verglichen werden.

Außerdem konnte mit Hilfe der Durchschnittsdiagramme das aerodynamisch günstigste Flügelprofil C ermittelt werden, das von Störfaktoren am geringsten beeinflusst wurde und zugleich bei idealen Bedingungen durchgehend den höchsten Auftriebswert zeigte.

Um einen möglichen Ausblick zu geben, könnte man diese Störfaktoren lösen, indem man möglicherweise die Reibung in der Führung durch Weitung oder Schmierung verringert oder bei der Winkel und Auftriebs Messung die Geschwindigkeit auf ein Minimum verringert, sodass ein möglichst kleiner Staudruck auf der strömungszugeneigten Seite besteht.

Letztlich lässt sich aus dieser Arbeit schließen, dass der Auftrieb von verschiedenen aerodynamischen Faktoren wie Anströmgeschwindigkeit und besonders die Form des Flügelprofils abhängt. Damit zeigt sich, dass auch zukünftig die Weiterentwicklung von aerodynamischen Flügelprofilen von Bedeutung ist, um effizient und energiesparend fliegen zu können.

7. Zeichenverzeichnis:

A	Fläche eines Staudrucks
A_{Fl}	Querschnittsfläche eines Flügelprofils
A_M	Fläche der angeströmten Stange der Montierung
b	Tiefe eines Flügelprofils
c_A	Auftriebsbeiwert (umfasst Anstellwinkel und Eigenschaften des Flügelprofils)
F_A	Auftriebskraft
F_N	Normalkraft
F_R	Reibungskraft
F_{St}	Staudruckkraft
g	Erdschwerebeschleunigung
h	Höhendifferenz
p	Druck (allgemein)
V	Strömungsgeschwindigkeit
α	Anstellwinkel (Winkel des Profils zur Anströmrichtung)
Γ	Zirkulationsströmungsstärke
μ	Reibungskoeffizient
ρ	Dichte (hier: Luftdichte)
\sim	direkt proportional
[gr]	Gramm (hier: gemessene Einheit der Auftriebskraft am Profil)
[°]	Grad
bzw.	beziehungsweise
<i>const.</i>	konstant
d.h.	das heißt

8. Quellenverzeichnis:

- Cartegni, A. (kein Datum). *alessandrocartegni*. Von <https://www.alessandrocartegni.com/wind-tunnel> abgerufen
- Cosmos Indirekt. (kein Datum). *Satz von Kutta-Joukowski*. Von https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Satz_von_Kutta-Joukowski abgerufen
- cosmos-direkt. (kein Datum). *Magnus Effekt*. Von <https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Magnus-Effekt> abgerufen
- Junglas, P. D. (kein Datum). *Tragflügel*.
- Leifiphysik. (kein Datum). *Bernoulli-Gleichung*. Von <https://www.leifiphysik.de/mechanik/stroemungslehre/grundwissen/bernoulli-gleichung> abgerufen
- Leifiphysik. (kein Datum). *Dynamischer Auftrieb und cA-Wert*. Von <https://www.leifiphysik.de/mechanik/stroemungslehre/grundwissen/dynamischer-auftrieb-und-crma-wert> abgerufen
- Lernhelfer. (kein Datum). *Bernoullisches Gesetz*. Von <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/bernoullisches-gesetz#> abgerufen
- Maschinenbau-Wissen. (kein Datum). *Arten der Reibung & Reibungskraft berechnen*. Von <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/kinetik/272-reibungskraft-berechnen> abgerufen
- Matzdorf, R. (13. Februar 2022). *Youtube: Auftrieb am Flugzeug*. Von <https://www.youtube.com/watch?v=Vs5gM7nSMBI> abgerufen
- Müller-Dum, D. (15. Mai 2023). *Welt der Physik: „Effizienz und Flugsicherheit optimieren“*. Von <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/luftfahrt-effizienz-und-flugsicherheit-optimieren/> abgerufen
- Neureiter, G. (2020). *unipub.uni-graz*. Von (Seite 78f.) <https://unipub.uni-graz.at/obvugrhs/download/pdf/5267209?originalFilename=true> abgerufen
- Neureiter, G. (2020). *unipub.uni-Graz*. Von (Seite 81) <https://unipub.uni-graz.at/obvugrhs/download/pdf/5267209?originalFilename=true> abgerufen
- Sigloch, H. (2021). 4.2.9.1 Magnus-Effekt. In H. Sigloch, *Technische Fluidmechanik 11. Auflage* (S. 255-256). Bad Überkingen: Springer-Verlag.
- Sigloch, H. (2021). 4.2.9.2 Tragflügeltheorie. In H. Sigloch, *Technische Fluidmechanik 11. Auflage* (S. 256-260). Bad Überkingen: Springer-Verlag.
- Sigloch, H. (2021). 4.3.3 Kräfte an Umströmten Tragflächen. In H. Sigloch, *Technische Fluidmechanik* (S. 328). Bad Überkingen: Springer-Verlag.
- Sigloch, H. (2021). 4.3.3.5 Druckverteilung am Tragflügel. In H. Sigloch, *Technische Fluidmechanik 11. Auflage* (S. 335-336). Bad Überkingen: Springer Verlag.
- Sigloch, H. (2021). *Technische Fluidmechanik 11. Auflage*. Bad Überkingen: Springer Verlag.

Super User. (2. Dezember 2020). *5.1.2 Auftriebsbeiwert c_A - Formel für den Auftrieb*. Von <https://www.segelfliegengrundausbildung.de/index.php/theoretische-spl-ausbildung/5-grundlagen/5-1-2-auftriebsbeiwert-formel-fuer-den-auftrieb> abgerufen

SWR. (kein Datum). *SWR Warum? Fliegen 4/3*. Von <https://www.planet-schule.de/warum/fliegen/themenseiten/t4/s3.html> abgerufen

SWR. (kein Datum). *SWR Warum? Fliegen 4/4*. Von <https://www.planet-schule.de/warum/fliegen/themenseiten/t4/s4.html> abgerufen

Thomas, D. D. (1992). *Thomas-Flight-Test (Seite 3)*. Von http://www.thomas-flight-test.de/assets/pdf_files/Aerodynamik_Bilder.pdf abgerufen

Thomas, D. D. (1992). *Thomas-Flight-Test (Seite 4)*. Von http://www.thomas-flight-test.de/assets/pdf_files/Aerodynamik_Bilder.pdf abgerufen

Universität Göttingen. (2023). *Der Magnus-Effekt*. Von <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/3773> abgerufen

Universität Würzburg. (kein Datum). *Das Gesetz von Kutta Joukowski*. Von https://pawn.physik.uni-wuerzburg.de/video2/alpha/FluidDynamik/node25_mn.html abgerufen

Wikipedia. (2023). *Bernoulli-Gleichung*. Von Bernoulli-Gleichung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bernoulli-Gleichung> abgerufen

8.1 Literaturverzeichnis

Sigloch, H. (2021). *Technische Fluidmechanik 11. Auflage*. Bad Überkingen: Springer Verlag.

8.2 Internetquellen

Cartegni, A. (kein Datum). *alessandrocartegni*. Von <https://www.alessandrocartegni.com/wind-tunnel> abgerufen

Cosmos Indirekt. (kein Datum). *Satz von Kutta-Joukowski*. Von https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Satz_von_Kutta-Joukowski abgerufen

cosmos-direkt. (kein Datum). *Magnus Effekt*. Von <https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Magnus-Effekt> abgerufen

Junglas, P. D. (kein Datum). *Tragflügel*.

Leifiphysik. (kein Datum). *Bernoulli-Gleichung*. Von <https://www.leifiphysik.de/mechanik/stroemungslehre/grundwissen/bernoulli-gleichung> abgerufen

Leifiphysik. (kein Datum). *Dynamischer Auftrieb und c_A -Wert*. Von <https://www.leifiphysik.de/mechanik/stroemungslehre/grundwissen/dynamischer-auftrieb-und-crma-wert> abgerufen

Lernhelfer. (kein Datum). *Bernoullisches Gesetz*. Von <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/bernoullisches-gesetz#> abgerufen

- Maschinenbau-Wissen. (kein Datum). *Arten der Reibung & Reibungskraft berechnen*. Von <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/kinetik/272-reibungskraft-berechnen> abgerufen
- Matzdorf, R. (13. Februar 2022). *Youtube: Auftrieb am Flugzeug*. Von <https://www.youtube.com/watch?v=Vs5gM7nSMBI> abgerufen
- Müller-Dum, D. (15. Mai 2023). *Welt der Physik: „Effizienz und Flugsicherheit optimieren“*. Von <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/luftfahrt-effizienz-und-flugsicherheit-optimieren/> abgerufen
- Neureiter, G. (2020). *unipub.uni-graz*. Von <https://unipub.uni-graz.at/obvugrhs/download/pdf/5267209?originalFilename=true> abgerufen
- Super User. (2. Dezember 2020). *5.1.2 Auftriebsbeiwert c_A - Formel für den Auftrieb*. Von <https://www.segelfliegengrundausbildung.de/index.php/theoretische-spl-ausbildung/5-grundlagen/5-1-2-auftriebsbeiwert-formel-fuer-den-auftrieb> abgerufen
- SWR. (kein Datum). *SWR Warum? Fliegen 4/3*. Von <https://www.planet-schule.de/warum/fliegen/themenseiten/t4/s3.html> abgerufen
- SWR. (kein Datum). *SWR Warum? Fliegen 4/4*. Von <https://www.planet-schule.de/warum/fliegen/themenseiten/t4/s4.html> abgerufen
- Thomas, D. D. (1992). *Thomas-Flight-Test*. Von http://www.thomas-flight-test.de/assets/pdf_files/Aerodynamik_Bilder.pdf abgerufen
- Universität Göttingen. (2023). *Der Magnus-Effekt*. Von <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/3773> abgerufen
- Universität Würzburg. (kein Datum). *Das Gesetz von Kutta Joukowski*. Von https://pawp.physik.uni-wuerzburg.de/video2/alpha/FluidDynamik/node25_mn.html abgerufen
- Wikipedia. (2023). *Bernoulli-Gleichung*. Von Bernoulli-Gleichung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Diskussion:Bernoulli-Gleichung> abgerufen

9. Danksagung:

An dieser Stelle möchte ich all denjenigen danken, die mich bei meiner Seminararbeit und bei meinem Experiment unterstützt und gefördert haben.

Mein Dank gebührt zuerst der Firma Cohu GmbH, die sich bereit erklärte, die für das Experiment erforderlichen Flügelprofile mit ihrem 3D-Drucker zu drucken.

Ebenfalls möchte ich mich bei Jorrit Braun bedanken, der mir bei der Entwicklung meines Windkanals einige Tipps und Probleme aufzeigte.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern für ihre Unterstützung und das Korrekturlesen bedanken.

Simon Wagner

Kolbermoor, 03.11.2023



Seminararbeit

Erklärung der eigenständigen Erstellung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift des Verfassers