

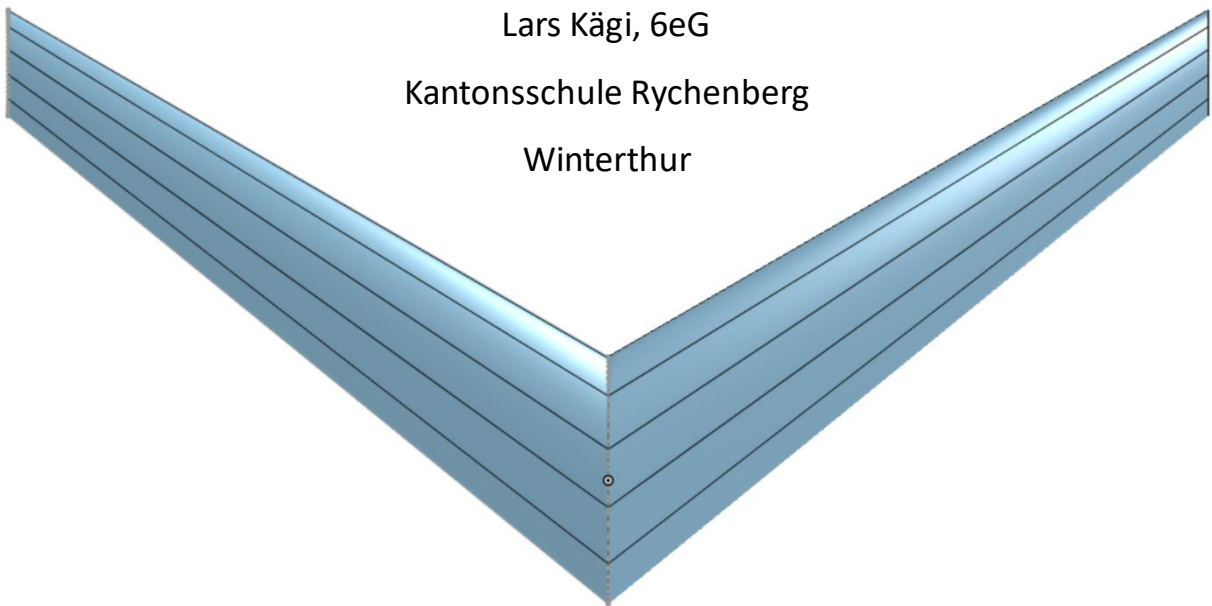
Analyse des aerodynamischen Verhaltens von nach vorne gerichteten Tragflächen

Vorgelegt von:

Lars Kägi, 6eG

Kantonsschule Rychenberg

Winterthur



Betreuende Lehrperson: Matias Meier Trüllinger

Zweitbeurteilende Lehrperson: Martina Egloff

Abgabedatum: 29.11.2024

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
1 Einleitung.....	3
1.1 Einstieg	3
1.2 Motivation und zentrale Fragen	5
2 Theorie	6
2.1 Wichtiges Grundverständnis für den praktischen Teil	6
2.2 Das Pfeilen von Tragflächen.....	9
2.3 Historischer Einschub zur positiven Pfeilung	10
2.4 Vor- und Nachteile von Tragflächen mit positiver Pfeilung.....	10
2.5 Vergleich zwischen der positiven und der negativen Pfeilung	12
2.6 Historischer Einschub zur negativen Pfeilung	14
2.7 Hypothesen zu den Resultaten des Versuchs	16
3 Der Versuch	17
3.1 Produktion der Flügel.....	17
3.1.1 Konstruktion im CAD-Programm	17
3.1.2 3D-Drucken und Nachbearbeitung	18
3.2 Der Versuch an der KRW	19
3.2.1 Windkanal an der Schule	19
3.2.2 Passende Halterung	20
3.2.3 Durchführung des Versuchs an der KRW	21
3.2.4 Nachbearbeitung der Daten des Windkanals der KRW	22
3.3 Der Versuch an der ZHAW	22
3.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung des Versuchs an der ZHAW	22
3.3.2 Nachbearbeitung der Ergebnisse der ZHAW	25
4 Resultate und Diskussion	27
4.1 Resultate KRW	27
4.2 Analyse Versuch KRW.....	28
4.3 Resultate ZHAW.....	28
4.4 Analyse Versuch ZHAW	30
4.5 Fehleranalyse	31
4.6 Vergleich zwischen beiden Windkanälen	31
4.7 Rekapitulieren der Hypothesen.....	32
4.8 Nicht berücksichtigte Fehlerquellen	33
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	34

5.1	Zusammenfassen der Ergebnisse	34
5.2	Ausblick: Relevanz in der Zukunft.....	35
	Danksagung.....	35
6	Anhang: Ausmessen des Windkanals:	36
6.1	Überlegungen und Versuchsaufbau.....	36
6.2	Resultate	37
6.3	Interpretation.....	37
7	Literaturverzeichnis	38
7.1	Primärliteratur.....	38
7.2	Internetquellen.....	38
7.3	Abbildungsverzeichnis.....	41
8	Rohdaten	45
8.1	Rohdaten KRW	45
8.2	Rohdaten ZHAW	47
8.3	Rohdaten Windgeschwindigkeiten	49

Abstract

In dieser Arbeit wird die Ausrichtung der Flügelspitzen in die Bewegungsrichtung, also nach vorne, aerodynamisch untersucht und mit nach hinten gerichteten Flügeln verglichen. Dieser Vergleich wird sowohl theoretisch betrachtet als auch praktisch in einem Versuch im Windkanal durchgeführt. Für den praktischen Teil werden Flügel entworfen und 3D-gedruckt. Anschliessend werden die Auftriebs- und Widerstandskraft mit einer passenden Halterung gemessen und zwischen den jeweiligen 3D-gedruckten Modellflügeln verglichen. Die Messungen werden sowohl im Windkanal der KRW als auch im professionellen Windkanal der ZHAW durchgeführt.

1 Einleitung

1.1 Einstieg

Betrachten Sie die Abbildungen 1, 2 und 3. Neben Unterschieden wie Grösse oder Antriebsmethode zwischen den drei verschiedenen Flugzeugen, kann man auch unterschiedliche Ausrichtungen der Flügel feststellen. Betrachtet man die Flügelform moderner Verkehrsflugzeuge wie z.B. des A350 auf Abb. 1, fällt auf, dass die Tragflächen entgegen der Bewegungsrichtung schräg nach hinten zeigen. Bei kleineren Flugzeugen wie der Cessna 208 Caravan auf Abbildung 2, die sich mit langsameren Geschwindigkeiten bewegt, sind die Flügel normalerweise in einem Winkel von ca. 90° zum Rumpf angebracht. Wie auf Abbildung 3 ersichtlich ist, gibt es auch Flugzeuge, deren Flügel in die Bewegungsrichtung schräg nach vorne zeigen. Dabei handelt es sich um eine sehr seltene Ausrichtung der Flügel. Ein Beispiel dafür ist der HFB 320 Hansa Jet, der auf Abbildung 3 ersichtlich ist.



Abbildung 1: A350 von Lufthansa



Abbildung 2: Cessna 208 Caravan



Abbildung 3: HFB 320

Die verschiedenen Ausrichtungen der Flügel liegen an der sogenannten Pfeilung der jeweiligen Flügel. Als Pfeilung bezeichnet man den Winkel zwischen der Tragfläche und der Flugzeugquerachse. Wenn die Flügel nach hinten gerichtet sind, spricht man von positiver Pfeilung, resp. einem positiven Pfeilungswinkel (Wikipedia, Pfeilung). Wenn in dieser Arbeit von Pfeilung resp. von einem Pfeilungswinkel gesprochen wird, ist damit die Vorderkantenpfeilung gemeint. Beachten Sie zum besseren Verständnis der Pfeilung Abbildung 4.

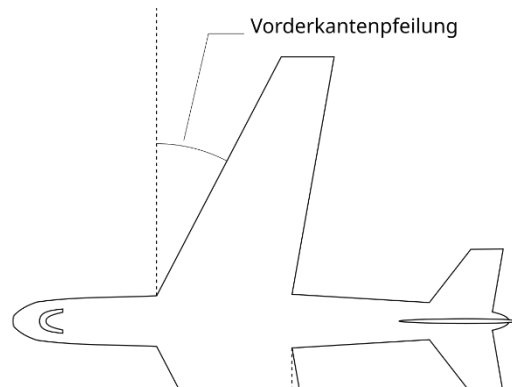


Abbildung 4: Vorderkantenpfeilung

Neben der positiven Pfeilung gibt es, wie auf den Abbildungen auf der vorherigen Seite ersichtlich, auch andere Flügelausrichtungen. Die Flügel der auf Abbildung 2 ersichtlichen Cessna sind in keine Richtung gerichtet, haben also keinen Pfeilungswinkel resp. keine Pfeilung. Dabei spricht man von einem rechteckigen oder einem ungepfeilten Flügel. Bei nach vorne gerichteten Flügeln, beispielsweise wie bei der HFB 320, spricht man von negativ gepfeilten Flügeln oder Flügeln mit negativer Pfeilung. Die Spitze der Tragfläche befindet sich vor dem Tragflächenansatz und zeigt nach vorne, wodurch eine spezielle Formung des Flügels entsteht (Wikipedia, Pfeilung). Diese spezifische Art der Pfeilung wird in dieser Arbeit sowohl praktisch als auch theoretisch vertieft thematisiert und untersucht.

Im ersten, theoretischen Teil werden die Grundlagen für nach hinten sowie nach vorne gerichtete Tragflächen generell thematisiert. Ausserdem werden wichtige Begriffe, Darstellungsmethoden und Werte eingeführt, die für den zweiten, praktischen Teil nötig sind. In diesem zweiten Teil wird ein praktischer Versuch mit zwei 3D-gedruckten Modellflügeln in Windkanälen durchgeführt. Es wird das aerodynamische Verhalten von einem nach vorne gerichteten Flügel und einem nach hinten gerichteten Flügel im Windkanal der KRW sowie im professionellen Windkanal an der ZHAW verglichen. Dazu werden die Kräfte Auftrieb und Widerstand gemessen und zwischen den beiden Flügeln verglichen. So können dann Aussagen über das aerodynamische Verhalten der beiden Flügel getroffen werden und mit den im Theorieteil aufgestellten Hypothesen verglichen werden.

1.2 Motivation und zentrale Fragen

Für mich war schon zu Beginn der Themenwahl im Februar 2024 klar, dass meine Maturaarbeit im Gebiet der Aerodynamik angesiedelt sein sollte. Dem zugrunde liegt mein grosses Interesse an der Luftfahrt und der Technik dahinter. Das grosse Themengebiet der Aerodynamik musste für die Arbeit aber stark eingegrenzt werden. Während diesem Prozess habe ich mich erstmals mit der negativen Pfeilung bei Tragflächen auseinandergesetzt, und somit einen interessanten Themenbereich gefunden, den ich mithilfe meiner Maturaarbeit vertiefen wollte. Ich sah darin eine interessante Grundlage für eine Maturaarbeit, da ich so die theoretischen Aspekte der Pfeilung und der Aerodynamik generell vertiefen und einen praktischen Teil einbauen konnte. So konnte ich mich den Fragen widmen, die ich in meiner Arbeit beantworten wollte. Diese sahen folgendermassen aus:

- Wie wirkt sich eine nach vorne gerichtete Tragfläche im Vergleich zu einer rückwärts gerichteten Tragfläche auf die Werte Widerstand und Auftrieb aus und welche Vorteile und Herausforderungen resultieren daraus?
- Wie können die auf die Tragflächen wirkenden Kräfte Auftrieb und Widerstand genau gemessen werden?
- Inwiefern können Unterschiede bei den Kräften Auftrieb und Widerstand zwischen dem Windkanal an der KRW und dem professionellen Windkanal an der ZHAW gemessen werden?

2 Theorie

Dieses Kapitel umfasst den theoretischen Teil der Arbeit. Dabei werden alle Prinzipien erklärt, die für die Arbeit und den folgenden praktischen Teil wichtig sind. Ausserdem gibt es einen kurzen Exkurs zur Geschichte der gepfeilten Flügel.

2.1 Wichtiges Grundverständnis für den praktischen Teil

Die Arbeit hat das Ziel, die Auftriebs- und Widerstandskräfte der beiden Flügel zu messen und zu vergleichen. Zur kurzen Erklärung dieser beiden Kräfte: Die Kräfte Auftrieb und Widerstand entstehen, wenn ein Körper, im Falle dieses Versuchs ein Flügel, umströmt wird. Der Auftrieb stellt die Komponente dar, die senkrecht zur Strömungsrichtung zeigt (Leifiphysik, Dynamischer Auftrieb und C_A -Wert). Beim Widerstand handelt es sich um die Kraft, welche der Bewegungsrichtung des Objekts entgegen und waagrecht zur Strömungsrichtung gerichtet ist. Beide Kräfte steigen bei grösser werdender Geschwindigkeit normalerweise an. Was zum Verständnis der Nachbearbeitung der Daten sehr wichtig ist: die Auftriebskraft ist immer senkrecht zur Strömungsrichtung gerichtet, die Widerstandskraft ist immer waagrecht zur Strömungsrichtung gerichtet. Eine Veränderung des Anstellwinkels hat somit auf die Richtung der Kräfte keinen Einfluss. Betrachten Sie zur Veranschaulichung die Abbildung 5. Dort sehen Sie, dass die Auftriebskraft entgegen der Gewichtskraft und die Widerstandskraft entgegen der Antriebskraft gerichtet ist.

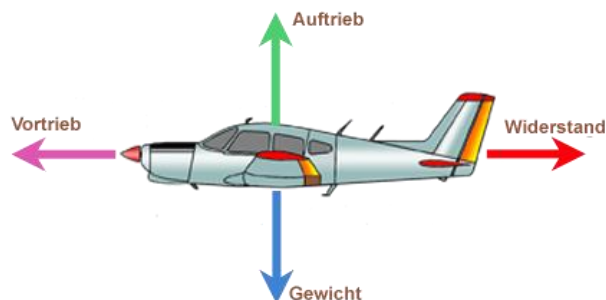


Abbildung 5: Veranschaulichung der auf ein fliegendes Flugzeug wirkenden Kräfte Vortrieb, Auftrieb, Widerstand und Gewichtskraft

Die Kräfte variieren je nach gewähltem Anstellwinkel. Ein Anstellwinkel entsteht, wenn ein Flügel nicht mehr waagrecht zur Strömungsrichtung gerichtet ist, sondern gekippt wird, sodass die Vorderkante des Profils höher als die Hinterkante des Profils liegt. Beachten Sie dazu Abbildung 6, wo α den Anstellwinkel darstellt.

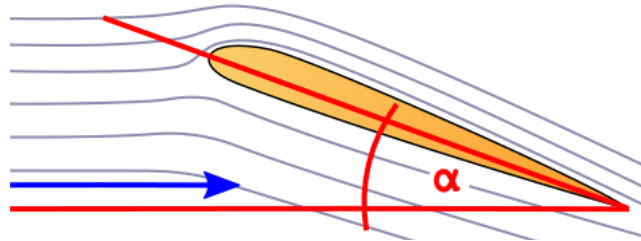


Abbildung 6: Anstellwinkel einer Tragfläche

In den Versuchen an der ZHAW und an der Schule wurden Anstellwinkel von 0° bis 25° getestet. Wird der Anstellwinkel erhöht, hat dies normalerweise sowohl einen höheren Auftrieb als auch einen höheren Widerstand zur Folge. Dieses Phänomen lässt sich beispielsweise beobachten, wenn man die Hand aus dem fahrenden Auto hält. Beim kontinuierlichen Erhöhen des Anstellwinkels der waagrecht gehaltenen Hand erfährt diese eine Erhöhung des Widerstands und des Auftriebs (Fliegermagazin, Strömungsabriss).

Bei einem bestimmten Anstellwinkel, zusammen mit einer bestimmten Geschwindigkeit, kommt es zum Strömungsabriss. Dabei handelt es sich, wie der Name sagt, um ein Abreißen der Strömung an der Flügeloberseite. So gleitet die Strömung nicht mehr gleichmässig dem Profil entlang, was eine abrupte Verringerung der Auftriebskraft und eine Erhöhung des Widerstands zur Folge hat (Wikipedia, Strömungsabriss).

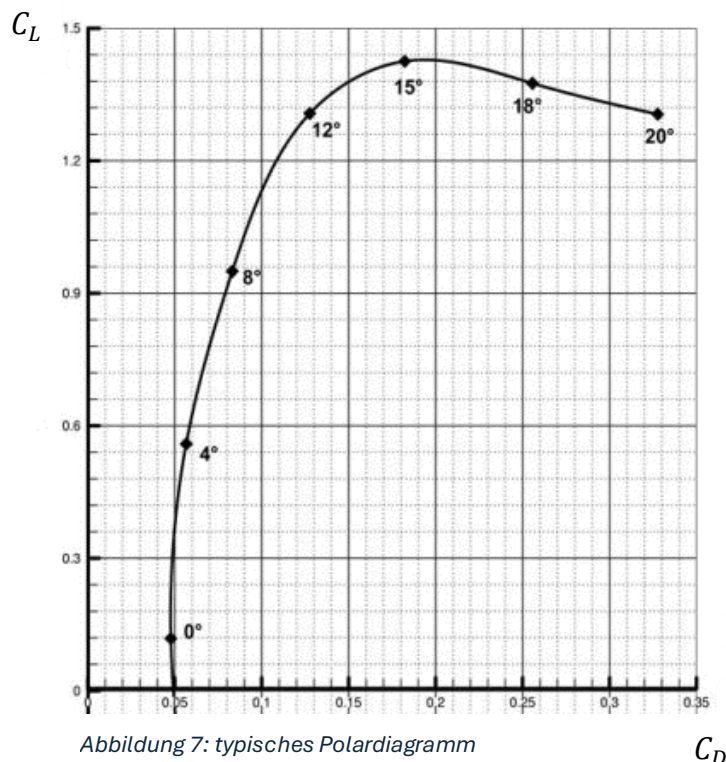
Um beispielsweise einen Strömungsabriss zu identifizieren, aber auch um die beiden Flügel generell zu vergleichen, müssen wichtige Werte eingeführt werden. Wichtig sind vor allem der Auftriebsbeiwert C_L (L für Englisch «lift») und der Widerstandsbeiwert C_D (D für Englisch «drag»). Die dimensionslosen Werte sind gängige Mittel, um das aerodynamische Verhalten von Flügeln zu vergleichen. Die dimensionslosen Werte der beiden Flügel können unabhängig von Druck und Flügelfläche verglichen werden. Diese Werte sind beim Vergleichen von verschiedenen Flügelprofilen und Flügeln generell sehr spannend. Folgende Grössen werden für die Berechnung des Auftriebsbeiwerts benötigt:

- $\alpha = \text{Anstellwinkel in Grad}$
- $F_L = \text{Auftriebskraft in N}$
- $q = \text{dynamischer Druck in Pa}$
- $A = \text{projizierte Flügelfläche in m}^2 \text{ bei } \alpha = 0$

Beim dynamischen Druck q handelt es sich um den zusätzlichen Druck, den die Luft aufgrund der Bewegung ausübt. Der dynamische Druck ist abhängig von Dichte und Geschwindigkeit der Luft (Statischer Druck vs. Dynamischer Druck vs. Gesamtdruck).

Die Berechnung des Auftriebsbeiwerts wird mit der Formel $C_L(\alpha) = \frac{F_L}{q \times A}$ durchgeführt. Den Widerstandsbeiwert C_D kann man berechnen, indem man die Auftriebskraft durch die Widerstandskraft F_D ersetzt: $C_D = \frac{F_D}{q \times A}$.

Die beiden dimensionslosen Beiwerte können in einem sogenannten Polardiagramm zusammengeführt werden. Im Polardiagramm wird für eine bestimmte Geschwindigkeit der Auftriebsbeiwert dem Widerstandsbeiwert gegenübergestellt. So bekommt man für jeden Flügel eine Kurve. Ein typisches Polardiagramm sehen Sie auf Abbildung 7. Jeder Datenpunkt auf der Kurve beinhaltet die Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte für einen bestimmten Anstellwinkel. Der Widerstandswert wird auf der X-Achse dargestellt, der Auftriebsbeiwert auf der Y-Achse.



2.2 Das Pfeilen von Tragflächen

Sie als Leser kennen nun die Grundlagen zur Auftriebs- und Widerstandskraft sowie zu weiteren Ausdrücken, die später bei der Analyse und der Präsentation der Resultate notwendig sind. Zuerst ist es aber wichtig, dass Sie die Grundlagen zur Pfeilung eines Flügels erlangen.

Als Pfeilung bezeichnet man den Winkel zwischen dem Flügel und der Flugzeugquerachse. Die Flugzeugquerachse bildet einen rechten Winkel mit der Flugzeugachse (Wikipedia, Pfeilung). Bei einem nicht gepfeilten Flügel stehen die Tragflächen somit in einem Winkel von 0° zur Flugzeugquerachse und in einem Winkel von 90° zur Flugzeugachse. Bei der Pfeilung wird der Flügel nun nach hinten oder nach vorne gerichtet. Betrachten Sie zum besseren Verständnis Abbildung 8.

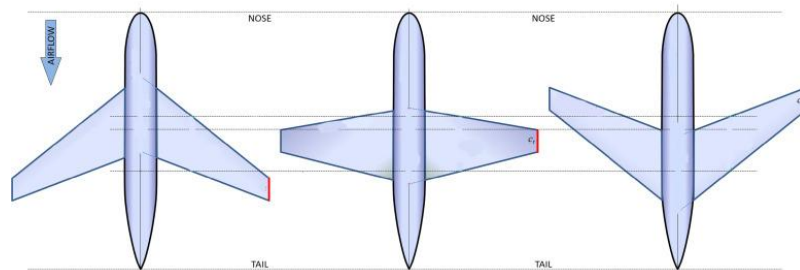


Abbildung 8: (v.l.n.r.) positiv gepfeilte Tragfläche, ungepfeilte Tragfläche, negativ gepfeilte Tragfläche

Wenn der Flügel nach hinten gerichtet ist, spricht man von positiver Pfeilung. In der Literatur findet man für diesen Begriff auch die Synonyme «Pfeilflügel» und «nach hinten gerichteter bzw. gepfeilter Flügel». In dieser Arbeit werden die Begriffe «positive Pfeilung» und «nach hinten gerichteter bzw. gepfeilter Flügel» als Synonyme verwendet. Bei einer Ausrichtung der Flügelspitzen nach vorne, also in die Bewegungsrichtung, spricht man von negativer Pfeilung. Auch zu diesem Begriff findet man in der Literatur unterschiedliche Begriffe. In dieser Arbeit werden die Begriffe «negativ gepfeilt» und «nach vorne gerichtet bzw. gepfeilt» verwendet. Je grösser die Pfeilung im positiven Bereich ist, desto weiter zeigt die Flügelspitze entgegen der Bewegungsrichtung, also nach hinten. Je grösser der Betrag der negativen Pfeilung ist, desto weiter zeigen die Flügelspitzen in die Bewegungsrichtung, also nach vorne. Je grösser der Betrag der Pfeilung, desto stärker ist die Abweichung zu einem ungepfeilten Flügel. Bevor wir uns den Unterschieden zwischen den verschiedenen Pfeilungsrichtungen widmen, folgt ein kurzer historischer Einschub zum positiv gepfeilten Flügel.

2.3 Historischer Einschub zur positiven Pfeilung

Die Idee des positiv gepfeilten Flügel existiert schon sehr lange: Short Brothers baute 1910 das erste Flugzeug mit gepfeilten Flügeln (Wikipedia, Pfeilung). Dessen Vorteile, vor allem für den Hochgeschwindigkeitsflug, präsentierte Adolf Busemann am 30. September 1935 anlässlich der 5. Volta-Konferenz in Rom. Das von ihm vorgestellte Konzept wurde bereits ein Jahr später von der deutschen Luftwaffe zu einem Militärgeheimnis erklärt (John D. Anderson, Jr., 2011; S. 516). Ab 1939 begann Messerschmitt mit der Entwicklung eines Flugzeuges mit positiv gepfeilten Flügeln, 1942 folgte der Erstflug der Messerschmitt Me 262 (Wikipedia, Messerschmitt Me262).



Abbildung 9: Eine Me 262 auf dem Flugplatz Dübendorf

2.4 Vor- und Nachteile von Tragflächen mit positiver Pfeilung

Sie kennen nun den nach hinten gepfeilten Flügel und können dessen Entstehung historisch einordnen. Doch welche Vorteile bringt das Pfeilen eines Flügels überhaupt? Dieser Frage wird im folgenden Abschnitt nachgegangen.

Bei einem ungepfeilten, rechteckigen Flügel überströmt logischerweise der gesamte Betrag des Luftstroms die Tragfläche in Strömungsrichtung, also von der Vorderkante bis zur Hinterkante des Flügels. Bei einem nach hinten gepfeilten Flügel funktioniert das etwas anders: Bei einem gepfeilten Flügel kann der Luftstrom in zwei Komponenten aufgeteilt werden. Eine Komponente zeigt senkrecht zur Flügel-Vorderkante, die andere zeigt parallel der Flügelkante entlang (Daniel P. Raymer, 2012, S. 79-80). Betrachten Sie dazu Abbildung 10.



Abbildung 10: Aufteilung der Strömung bei gepfeiltem Flügel

Die parallel zur Flügelkante verlaufende Komponente der Strömung erzeugt keinen Effekt auf die Umströmung der Tragfläche (Wikipedia, Pfeilung). Die Strömung ist dadurch über dem Flügel lokal kleiner, da nur die senkrecht zur Flügelkante verlaufende Komponente für die komplette Umströmung des Profils relevant ist. Durch diese langsamere lokale Strömung über dem Flügelprofil kann das Flugzeug mit schnelleren Geschwindigkeiten unterwegs sein, bis es zu einer drastischen, sprunghaften Erhöhung des Widerstands aufgrund einer sogenannten Schockwelle kommt. Solch eine Schockwelle entsteht, wenn auf der Oberseite der Tragfläche die Schallgeschwindigkeit erreicht wird (Daniel P. Raymer, 2012, S. 79-80). Zur Vertiefung der Vorteile von positiv gepfeilten Flügeln ist das Buch «Aircraft Design: A conceptual Approach» von Daniel P. Raymer (S. 79-80) und das Buch «Fundamentals of Aerodynamics» von John D. Anderson, Jr. (S.740-742) empfehlenswert.

Die Aufspaltung der Strömung in zwei Komponenten führt neben den verbesserten Eigenschaften im hohen Geschwindigkeitsbereich jedoch auch zu einem Problem: Da die lokale Strömung, die über das Profil fließt, nun kleiner ist, wird folglich weniger Auftrieb generiert. Dies wird vor allem zum Problem, wenn sich das Flugzeug mit langsameren Geschwindigkeiten bewegt, beispielsweise vor einer Landung, da bei langsameren Geschwindigkeiten auch weniger Auftrieb erzeugt wird. Dem reduzierten Auftrieb muss dann mit Landeklappen und erhöhten Landegeschwindigkeiten entgegengewirkt werden (Daniel P. Raymer, 2012, S. 79-91). Für Flugzeuge, die sich mit langsamen Geschwindigkeiten weit weg vom Bereich der

Schallgeschwindigkeit fortbewegen, sorgt die Pfeilung der Tragflächen somit nur für Probleme wie einen verringerten Auftrieb und bietet keine Vorteile, weshalb z.B. Kleinflugzeuge meist ungefeilte, rechtwinklige Flügel besitzen.

2.5 Vergleich zwischen der positiven und der negativen Pfeilung

Bisher wurde die positiv gefeilte Tragfläche thematisiert. Dies ändert sich in diesem Abschnitt, wo die Unterschiede zwischen der positiven und der negativen Pfeilungsrichtung erläutert werden. «Es gibt keinen theoretischen Unterschied zwischen einem nach hinten gefeilten und einem nach vorne gefeilten Flügel» (Daniel P. Raymer, 2012, S.80 (engl., übersetzt mit DeepL)). Somit treffen die Erkenntnisse aus dem vorangehenden Kapitel auch auf den negativ gefeilten Flügel zu. Trotzdem gibt es einige Unterschiede im Flugverhalten der beiden Flügel, die nachfolgend thematisiert werden.

Der Prozess des Strömungsabrisses verläuft beim negativ gefeilten Flügel anders als beim positiv gefeilten Flügel. Eine nach hinten gefeilte Tragfläche ist so entwickelt, dass die Strömung entlang der Flügelvorderkante an die Tragflächenspitze «gleitet». Diese über die Spannweite resultierende Strömung hat an der Spitze zur Folge, dass sich die Strömung dort «ablöst». Dadurch tritt ein Strömungsabriss an der Spitze des Flügels relativ früh ein. Beim negativ gefeilten Flügel bewegt sich die Strömung nicht wie bei einer positiven Pfeilung von Flügelwurzel zu Flügelspitze, sondern von der Flügelspitze in Richtung Flügelwurzel (siehe Abbildung 11). Dies sorgt dafür, dass der Fluss der Strömung an der Flügelspitze bis zu hohen Anstellwinkeln stabil bleibt. So kann abschliessend die Aussage getroffen werden, dass der Strömungsabriss beim positiv gefeilten Flügel stärker und früher eintritt als beim negativ gefeilten Flügel (Daniel P. Raymer, 2012, S.830).

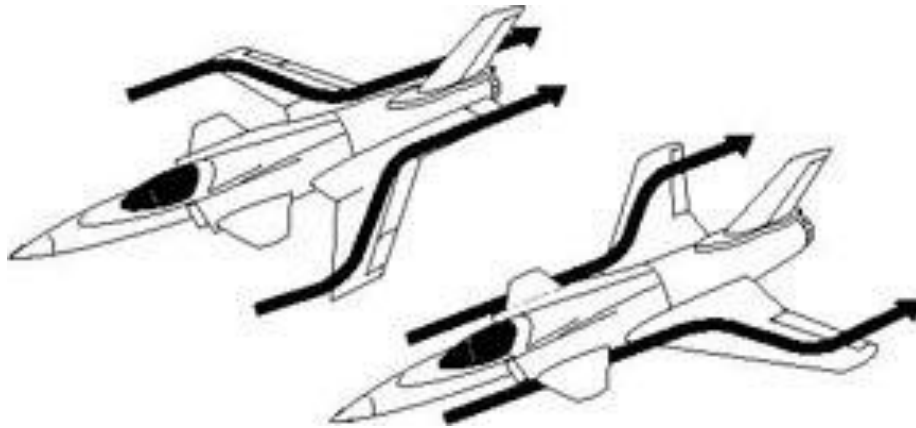


Abbildung 11: Fluss der Strömung über positiv und negativ gepfeilte Tragflächen

Wenn Sie sich nun die Frage stellen, wieso man heute keine Flugzeuge mit negativ gepfeilten Tragflächen sieht, gibt Daniel P. Raymer in der fünften Edition seines Buches «Aircraft Design: A conceptual approach» eine Antwort: Beim Pfeilen einer Tragfläche nach vorne entsteht ein schwerwiegendes strukturelles Problem: Aufgrund des Biegens des Flügels um dessen Längsachse, kommt es beim vorwärts gepfeilten Flügel zu einer Art Rückkopplung. Diese entsteht, weil durch das Biegen des Flügels ein höherer Anstellwinkel erzeugt wird, wodurch sich auch der Auftrieb erhöht. Jedoch sorgt der erhöhte Auftrieb wiederum dazu, dass sich der Anstellwinkel durch das Biegen erneut erhöht. Aufgrund dieser Rückkopplung kann es dazu kommen, dass ein herkömmlicher Flugzeugflügel aus Aluminium bricht. Abhilfe dafür können Verbundwerkstoffe schaffen, die so auch bei modernen Verkehrsflugzeugen verwendet werden. Im Gegensatz zu Aluminium sind diese Verbundwerkstoffe stabiler und können beim Flügel so eingesetzt werden, dass die Gefahr eines Flügelbruchs aufgrund der Rückkopplung ausgeschlossen werden kann (Daniel P. Raymer, 2012, S.830-831).

Auch wenn die strukturellen Probleme durch moderne, leichte und stabile Verbundwerkstoffe behoben werden könnten, bleiben andere zu beachtende Herausforderungen und Probleme. Während der vorwärts gepfeilte Flügel bei hohem Anstellwinkel gute Auftriebsresultate liefert, muss die Relevanz dieser Erkenntnisse eingeschränkt werden, da sich die Flügel des Flugzeuges selten in so hohen Anstellwinkeln befinden (Daniel P. Raymer, 2012, S.830-831).

2.6 Historischer Einschub zur negativen Pfeilung

Die Projekte mit negativ gepfeilten Flügeln begannen etwa zeitgleich mit dem Abschliessen der Versuche mit den positiv gepfeilten Flügeln. Nach den Tests mit den positiv gepfeilten Flügeln und dem Erstflug der Me 262, begann Junkers mit der Planung des Bombers Ju-287. Der Bomber wies, wie auf Abbildung 12 erkennbar, negativ gepfeilte Flügel auf. Die Junkers Ju-287 absolvierte ihren Erstflug 1944, insgesamt wurden aber nur 2 Flugzeuge hergestellt. Somit handelte es sich um einen Prototyp (Wikipedia, Junkers Ju 287).

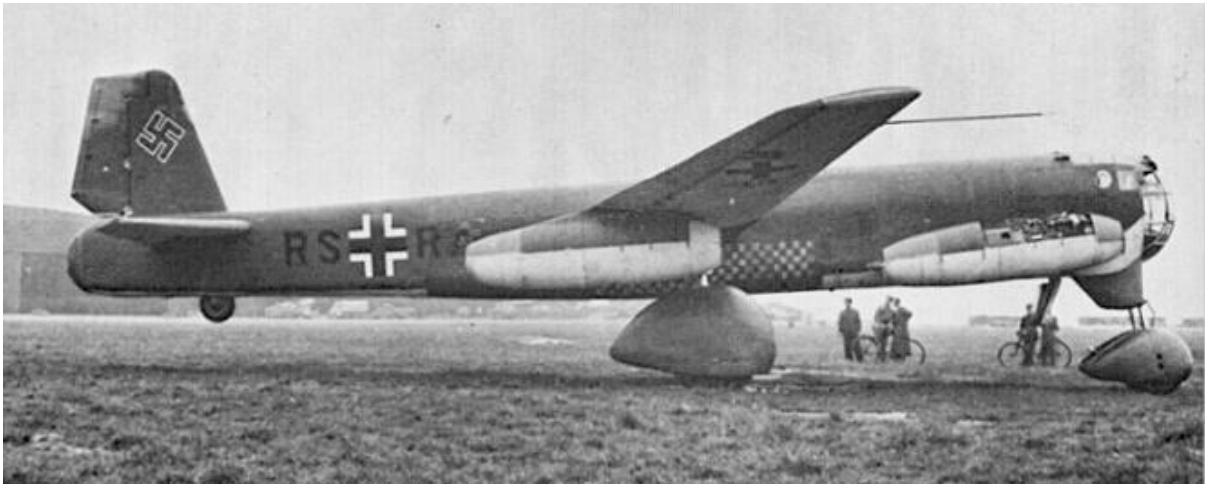


Abbildung 12: Seitenansicht der Ju 287

Beim bisher erwähnten Flugzeug mit negativer Pfeilung handelt es sich um ein Flugzeug mit militärischer Verwendung. Spannend ist aber auch die Entwicklung des HFB 320, einem Privatjet mit negativ gepfeilten Flügeln (siehe Abbildung 13). Der Erstflug des HFB 320 Hansa Jet fand im April 1964 statt und nebst zwei Prototypen, wurden 45 Maschinen verkauft (Wikipedia, HFB 320).



Abbildung 13: HFB 320 Hansa Jet

Die Anwendung der negativ gepfeilten Flügel bei einem Privatjet ist kein Zufall. Der Flügelkasten, also die primäre Tragstruktur und das strukturelle Zentrum des Flügels, muss bei normal gepfeilten Flügeln unter der Kabine angebracht werden. Bei Passagierflugzeugen stört das nicht weiter, da der Flügelkasten in den Frachtbereich des Flugzeugs implementiert werden kann. Bei kleineren Privatjets entsteht jedoch eine ästhetisch und widerstandstechnisch ungünstige Ausformung unter der Passagierkabine. Nun können aber vorwärts gepfeilte Flügel verwendet werden, damit der Flügelkasten hinter die Kabine verlegt werden kann. Somit verschwindet die Ausformung unter der Kabine, wodurch das Aussehen des Jets verbessert wird, und der Widerstand reduziert wird (Daniel P. Raymer, 2012, S. 831-832). Betrachten Sie Abbildung 14, wo das Problem visuell dargestellt wird.

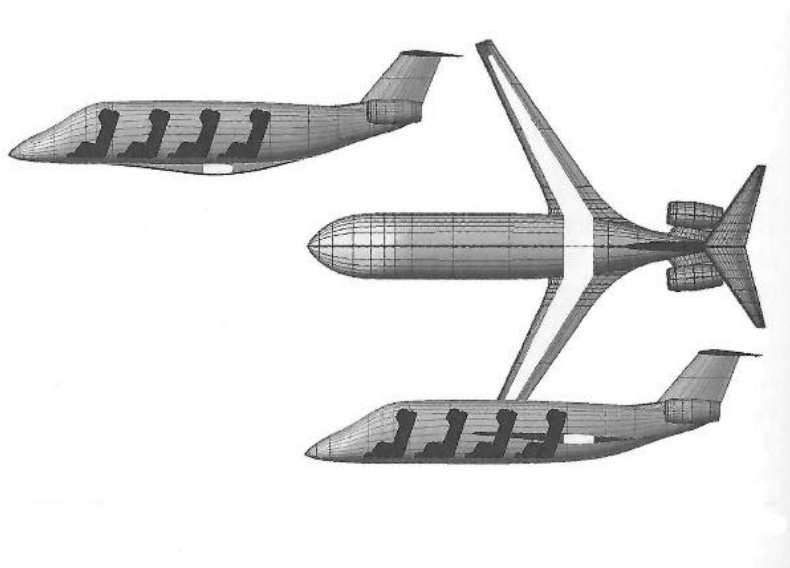


Abbildung 14 Platzierung der "wing box" bei Privatjets

2.7 Hypothesen zu den Resultaten des Versuchs

Nach der generellen Betrachtung des Themas können die für den Versuch wichtigen Erkenntnisse aus dem theoretischen Teil mit den folgenden aufgestellten Hypothesen überprüft werden:

- Bei niedrigen Anstellwinkeln ist mit ähnlichen Ergebnissen zwischen den beiden Flügeln zu rechnen
- Bei höheren Anstellwinkeln ab 15° wird erwartet, dass der negativ gepfeilte Flügel bezüglich der Widerstandskraft tiefere und bezüglich der Auftriebskraft höhere Kräfte als der positiv gepfeilte Flügel aufweist, da der Strömungsabriss beim positiv gepfeilten Flügel an den Flügelspitzen früher eintritt. Dieser Strömungsabriss hat einen drastischen, negativen Einfluss auf die beiden Kräfte.
- Die Messungen der ZHAW liefern präzisere Resultate als die Messungen an der KRW
- In beiden Windkanälen lassen sich ähnliche Resultate beobachten

3 Der Versuch

In diesem Kapitel geht es um den praktischen Teil der Arbeit. Es wird die Produktion der Flügel, der Messaufbau und die Messmethodik für beide Windkanäle thematisiert.

3.1 Produktion der Flügel

3.1.1 Konstruktion im CAD-Programm

Nach der Fixierung des Themengebiets konnte schnell mit der Konstruktion der Flügel begonnen werden. Für die Produktion des Flügels wurde der 3D-Druck gewählt. Um ein 3D-Objekt zu erstellen, braucht man ein CAD-Programm. Für das Konstruieren der Flügel wurde onshape ausgewählt. Onshape ist browserbasiert und ermöglichte einen einfachen Einstieg in das CAD-Zeichnen. Dank einigen YouTube-Tutorials konnte der grundsätzliche Umgang mit der Software schnell erlernt werden.

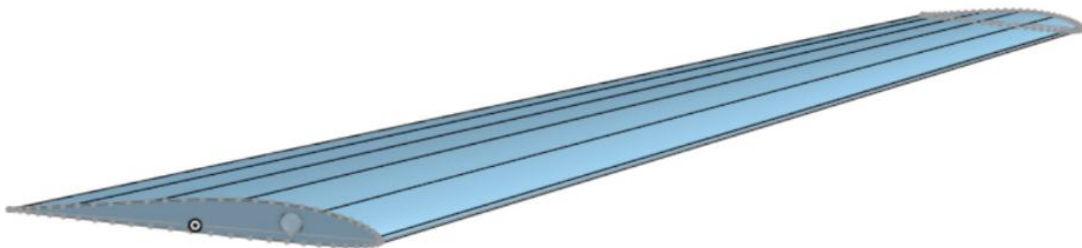


Abbildung 15: negativ gepfeilter Flügel im CAD-Programm

Vor der eigentlichen Konstruktion der Flügel mussten einige Werte definiert werden. Dazu gehörten die Spannweite der Flügel, die Länge des Flügels an der Flügelbasis und an der Flügelspitze und exakten Pfeilungen der Flügel. Um möglichst grosse Unterschiede zwischen den beiden Flügeln zu erhalten, wurden grosse Pfeilungswinkel von 30° für den positiv gepfeilten Flügel und -30° für den negativ gepfeilten Flügel gewählt. Waren die benötigten Grössen definiert, konnten die zwei Flügel problemlos im CAD-Programm konstruiert werden.

3.1.2 3D-Drucken und Nachbearbeitung

Die fertig konstruierten Flügel wurden in den Slicer «Ultimaker Cura» importiert und anschließend gedruckt. Um eine schöne Profiloberfläche zu erhalten, wurden die Flügel stehend gedruckt. Dank der guten Druckergebnisse mussten die Oberflächen der Flügel nicht nachbearbeitet werden. Um den Flügel später im Windkanal befestigen zu können, waren dennoch einige Handgriffe nötig. Mit tatkräftiger Unterstützung von Herrn Bertschi wurde zuerst die Stützstruktur von den Flügeln gelöst und anschliessend ein 15 mm tiefes Loch an der Flügelbasis ausgebohrt, um darin eine Aluminiumstange zu verkleben. Mithilfe dieser Aluminiumstange ist es möglich, die Tragflächen in die entworfene Halterung einzusetzen, mehr dazu folgt später. Einen der zwei fertigen Flügel sehen Sie auf Abbildung 16.

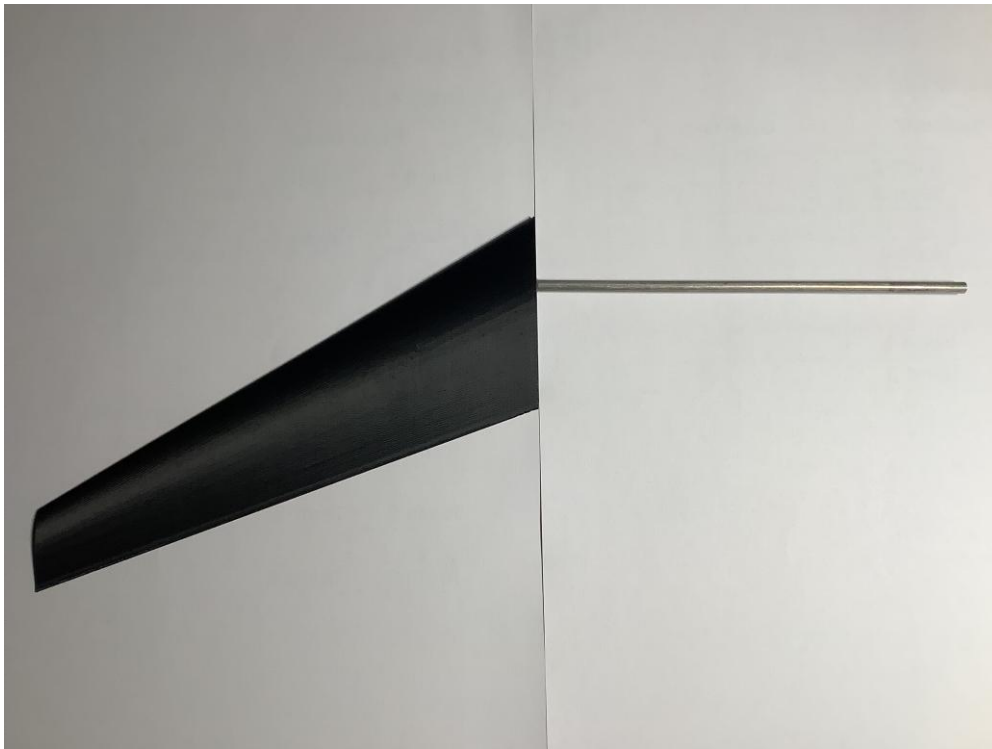


Abbildung 16: positiv gepfeilter Flügel für Versuche an der KRW

3.2 Der Versuch an der KRW

3.2.1 Windkanal an der Schule

Um die Kräfte an den Flügeln zu messen, braucht es neben den Flügeln selbst auch eine Luftströmung, die von einem Windkanal erzeugt wird. Der Windkanal an der Kantonsschule Rychenberg ist sehr einfach aufgebaut und erinnert eher an ein Gebläse (siehe Abbildung 17). Der Windkanal besteht aus dem zylinderartigen Hauptkörper, einem Einlass sowie einem Auslass. Am Einlass sind Propellerblätter montiert, die von einem Elektromotor betrieben werden (siehe Abbildung 18). Am Auslass können drei verschiedene Aufsätze angebracht werden, um den gewünschten Durchmesser des Luftstroms zu erhalten. Für den Versuch wurde der grösste Aufsatz mit einem Durchmesser von 195 mm verwendet.



Abbildung 17: Seitenansicht des Windkanals der KRW



Abbildung 18: Einlass mit Elektromotor des Windkanals der KRW

3.2.2 Passende Halterung

Um die Auftriebs- und Widerstandskraft messen zu können und um den Flügel richtig zu befestigen, war eine Halterung erforderlich. Um die passende Halterung für den Windkanal an der KRW zu finden, mussten die Anforderungen an die Halterung geklärt werden:

- Die Halterung muss eine gute Stabilität haben, um den Flügel und die Messapparatur zuverlässig zu halten und darf nicht anfällig für vom Windkanal ausgehende Vibrationen sein
- Die Halterung muss mit Materialien realisierbar sein, die an der Schule vorhanden sind
- Die Halterung muss entsprechend den verfügbaren Messmethoden genau sein

Anhand dieser Anforderungen konnte das Konzept einer einfachen Halterung mit Stativstangen erstellt werden. Die Messungen wurden mit Federkraftwaagen durchgeführt. Um die Messungen von Widerstand und Auftrieb durchzuführen, wurden zwei verschiedene Halterungen benötigt, die aber mit dem gleichen Prinzip funktionierten: Der Tragflügel wird mithilfe der in den Flügel eingesetzten Aluminiumstange in ein Scharnier eingespannt. Auf der anderen Seite des Scharniers gibt es einen Hebelarm, woran eine Federwaage montiert ist. Wirkt nun eine Kraft, bewegt sich der Flügel bei der Widerstandsmessung nach hinten, also entgegen der Strömungsrichtung. Bei der Auftriebsmessung wirkt eine Kraft nach oben, weshalb sich der Flügel nach oben bewegt. Die Federkraftwaage zeigt folglich eine Kraft an. Um den Flügel wieder in die Ausgangsposition zu bringen und um die Kraft abzulesen, wird die Apparatur mit dem Kraftmesser so weit nach hinten, bzw. bei der Auftriebsmessung nach oben gezogen, bis sich der Flügel wieder in der Ausgangsposition befindet. Dann wird die Kraft abgelesen. Betrachten Sie dazu die Abbildungen 20 und 21, wo der Prozess einer Widerstandsmessung ersichtlich ist.

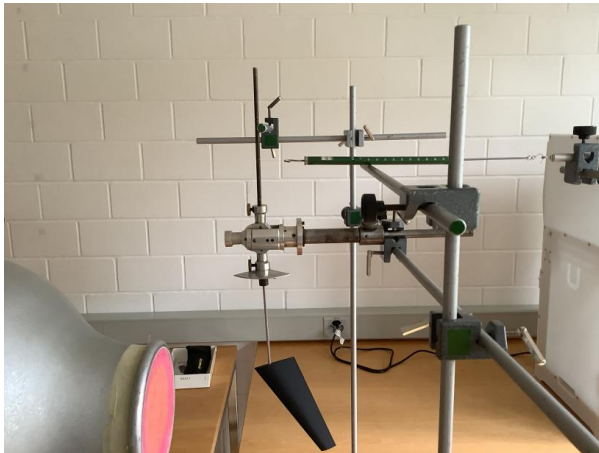


Abbildung 20: Versuchsaufbau mit eingespanntem Flügel, Windkanal inaktiv, Widerstandsmessung

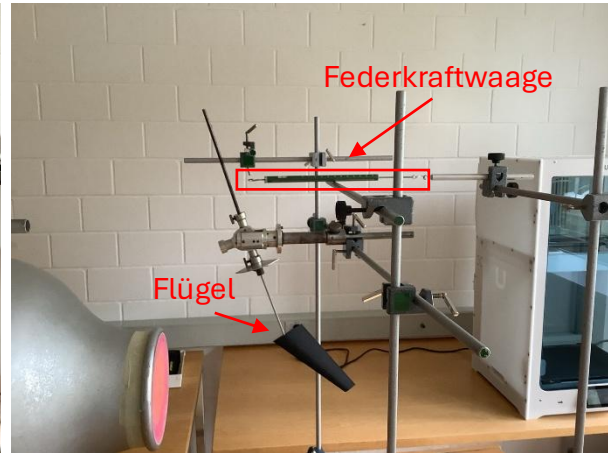


Abbildung 21: Versuchsaufbau mit eingespanntem Flügel, Windkanal aktiv, Widerstandsmessung

3.2.3 Durchführung des Versuchs an der KRW

Die eigentliche Durchführung des Versuchs an der Schule gestaltete sich dank der schon ausgewählten und aufgebauten Halterung ziemlich einfach. Für beide Flügel wurden die Auftriebs- und Widerstandskräfte für Anstellwinkel von 0° bis 25° gemessen, jeweils mit 2.5° Abständen, ausser zwischen 20° und 25° . Diese Messungen wurden bei den 3 Geschwindigkeiten 5, 10, und 15 m/s durchgeführt. So wurden pro Flügel 30 Messungen durchgeführt. Für die Widerstands- und Auftriebsmessungen wurden hauptsächlich 1 N-Federkraftmesser verwendet. Im Geschwindigkeitsbereich von 15 m/s und ab einem Anstellwinkel von 15° musste, vor allem bei den Auftriebsmessungen, auf einen 5 N-Federkraftmesser zurückgegriffen werden, da die gemessenen Kräfte 1 N knapp überstiegen.

3.2.4 Nachbearbeitung der Daten des Windkanals der KRW

Die ermittelten Daten mussten nicht stark nachbearbeitet werden, anders als dies bei den Messdaten der ZHAW der Fall war. Die Distanz zwischen dem Mittelpunkt und dem Flügelansatz betrug 19.5 cm. Einfachheitshalber wurde auf die Berechnung des aerodynamischen Schwerpunktes verzichtet. Da es sich um einen Vergleich der Tragflächen handelt, musste darauf geachtet werden, dass die Umstände identisch sind. Der Abstand zwischen dem Federkraftmesser und dem Mittelpunkt betrug 17.2 cm. Zur Berechnung der Daten musste somit das Hebelgesetz $F_1 \times l_1 = F_2 \times l_2$ berücksichtigt werden. Nach dem Auflösen für F_1 konnte folgende Formel ermittelt werden: $F_1 = \frac{F_2 \times 17.2}{19.5}$, wobei F_1 die tatsächliche Kraft und F_2 die vom Federkraftmesser gemessene Kraft darstellt.

Zur Berechnung der Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte wird unter anderem der dynamische Widerstand q benötigt. Während dieser im Windkanal der ZHAW gemessen wurde, musste er für die Messungen im Windkanal an der Schule berechnet werden. Dazu waren unter anderem Wetterdaten erforderlich. Ausserdem war die projizierte Flügelfläche bei einem Anstellwinkel von 0° notwendig, die bei beiden Flügeln 0.0085 m^2 betrug.

3.3 Der Versuch an der ZHAW

3.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung des Versuchs an der ZHAW

Der Versuchsaufbau an der ZHAW sah deutlich anders aus als jener an der Schule. Die ZHAW verfügt mit dem grossen Windkanal und den präzisen Messinstrumenten über sehr professionelles Equipment, welches nicht mit jenem der Schule verglichen werden kann (siehe Abbildung 22).



Abbildung 22: Windkanal ALFA der ZHAW

Bei der Betrachtung des sehr grossen Windkanals wurde schnell klar, dass die produzierten Flügel mit einer Flügelspannweite von lediglich 17 cm zu klein für den fast 1 m breiten Windkanal waren. Nach einigen Überlegungen fiel die Entscheidung zugunsten der Herstellung von zwei Nurflüglern. Dabei handelt es sich, wie auf der Abbildung 23 ersichtlich, um zwei Flügel ohne Rumpf.

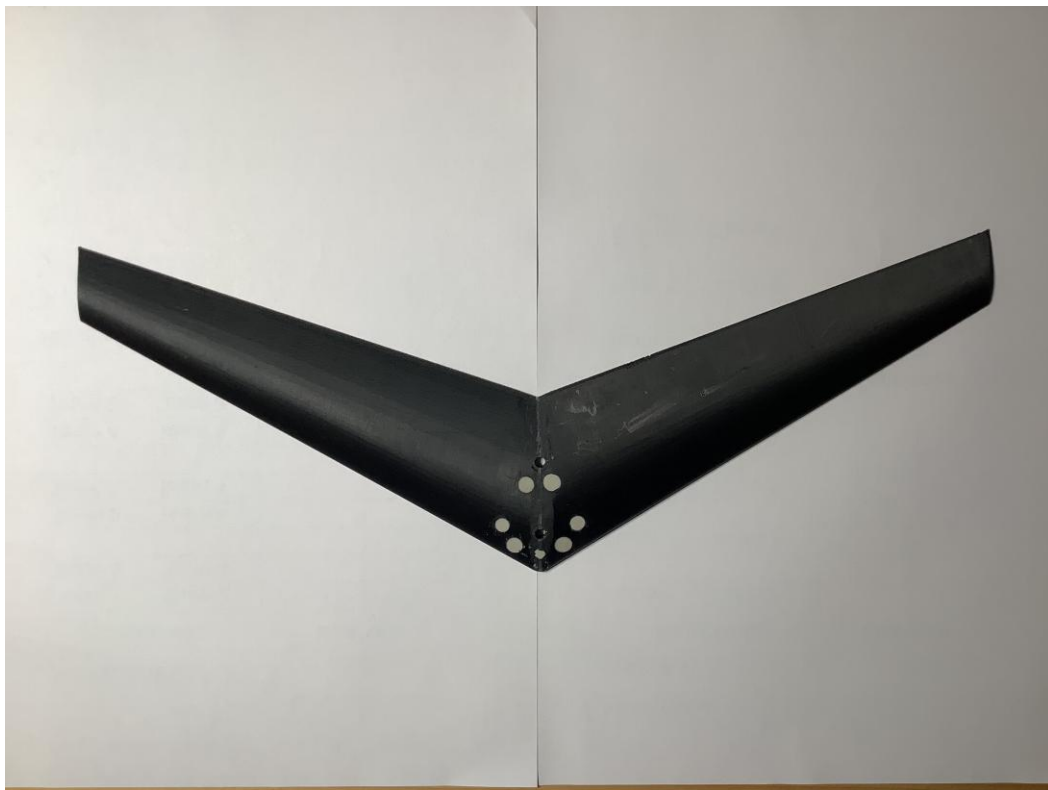


Abbildung 23: positiv gepfeilter Nurflügler für die Versuche an der ZHAW

Zusätzlich brauchte es für die Messungen im Windkanal der ZHAW weitere Anpassungen am Flügel: Für die Messungen wurde eine spezielle Waage verwendet. Um diese am Flügel anbringen zu können, musste ein Lochbild mit 6 Löchern in den Nurflügler implementiert werden. Die Flügel wurden im CAD-Programm bearbeitet und die Bohrungen für die Befestigung an der Waage wurden platziert. Die Flügel wurden einzeln gedruckt und danach zusammengefügt. Damit sie auch gut zusammenhielten, wurde eine 4 mm dicke und 30 mm lange Aluminiumstange verwendet und mit den Flügeln verklebt. Um das Drehen um die Achse der Aluminiumstange zu verhindern, wurden im CAD-Programm Noppen in die Flügel implementiert, wodurch die Flügel zusammengesteckt und verklebt werden konnten. Nach dem Befestigen der Flügel auf der Waage, traten beim Messen einige Komplikationen auf: Während beim Testen des ersten Nurflüglers keine Probleme auftraten, hatten die Messungen des zweiten Nurflüglers sehr eigenartige Resultate zur Folge. Nach dem Auswechseln der beinahe gesamten Messapparatur, gab es nur noch die Möglichkeit, dass die fehlerhaften Messwerte der etwas suboptimalen Befestigung der Flügel an der Waage geschuldet waren.

Dank grossartiger Hilfe von Herr Bertschi konnte innerhalb kurzer Zeit ein Adapter produziert werden, wodurch die anfänglichen Probleme behoben werden konnten. Der Adapter besteht aus einem Aluminiumstück, dass mit einem 3D-gedruckten Zwischenteil und somit mit dem Flügel verschraubt ist. Dank dem Aluminiumstück mit dem exakten Lochbild für die Waage konnten die Messungen im Windkanal der ZHAW im 2. Versuch problemlos durchgeführt werden. Die Messungen wurden an der ZHAW bei den Geschwindigkeiten 10 m/s, 15 m/s und 20 m/s durchgeführt. Die verschiedenen Anstellwinkel wurden identisch wie an der KRW von 0° bis 20° mit 2.5° Abständen und einer Messung bei 25° gewählt. Somit wurden insgesamt 10 Messungen pro Geschwindigkeit und Flügel durchgeführt. Der Messaufbau an der ZHAW ist auf Abbildung 24 ersichtlich.

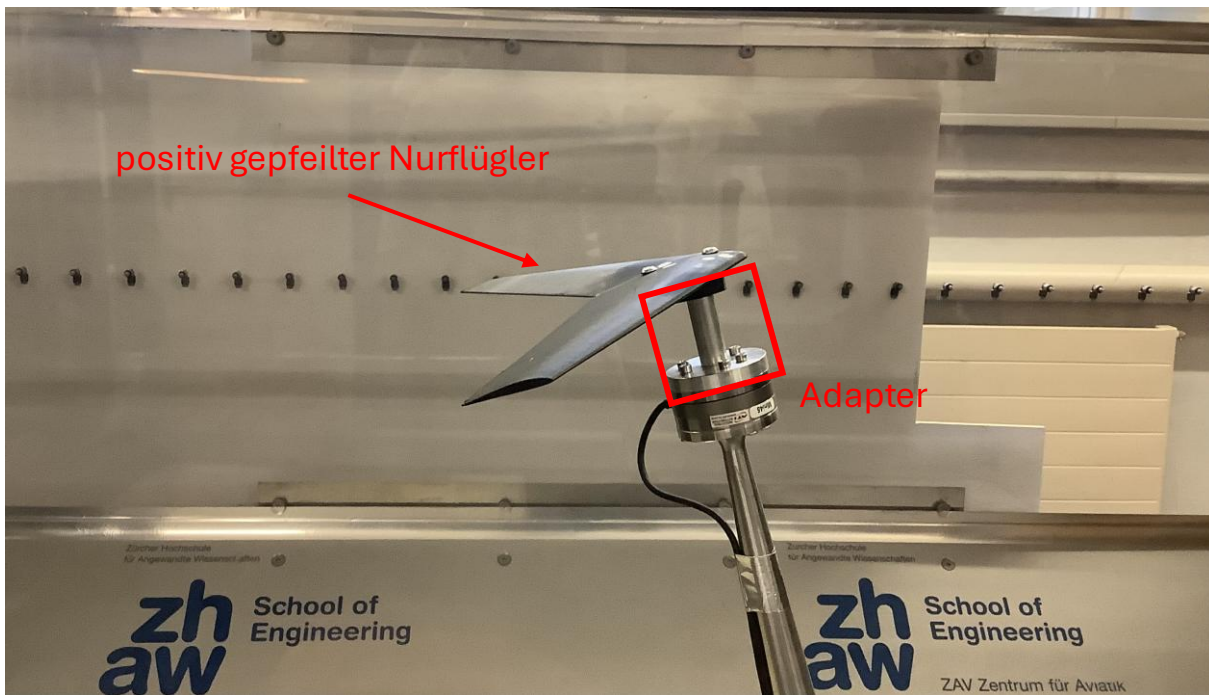


Abbildung 24: negativ gepfeilter Flügel mit Adapter an Waage der ZHAW befestigt

3.3.2 Nachbearbeitung der Ergebnisse der ZHAW

Die Messungen wurden mithilfe einer 6-Komponenten Waage durchgeführt. Die Waage misst die Kräfte horizontal und waagrecht zu ihrer Ausrichtung. Die Kraft F_{z+} zeigt dabei senkrecht nach oben, die Kraft F_x – waagrecht nach «hinten». Dies waren die beiden relevanten Kräfte für die Erhebung der gewünschten Daten von Widerstand (F_x) und Auftrieb (F_z). Bei einem Anstellwinkel von 0° entsprechen die Kräfte genau dem Widerstand und dem Auftrieb. Denn: Der Auftrieb wird immer senkrecht, der Widerstand immer waagrecht zur Strömungsrichtung gemessen. Und bei einem Anstellwinkel von 0° entspricht dies auch den Kräftermessungen der Waage. Bei einem Anstellwinkel, der nicht mehr 0° beträgt, passen diese beiden «Koordinatensysteme» nicht mehr zueinander. Wird der Anstellwinkel erhöht, so besteht die Kraft F_z nicht mehr nur aus dem Auftrieb, sondern die Komponente des Widerstands in der Kraft wird immer grösser. Dasselbe passiert auch mit der Kraft F_x . Denn auch dort steigt mit dem Erhöhen des Anstellwinkels die Auftriebskomponente der Kraft und bei der Kraft handelt es sich somit nicht mehr nur um die reine Widerstandskraft. Um nun die korrekten Werte für Auftrieb und Widerstand zu erhalten, mussten die einzelnen Komponenten berechnet werden. Nach einigen geometrischen und konstruktiven Überlegungen konnten die Formeln für die

Berechnung von Widerstand und Auftrieb aufgestellt werden. Betrachten Sie zum Verständnis des komplexen Themas Abbildung 25.

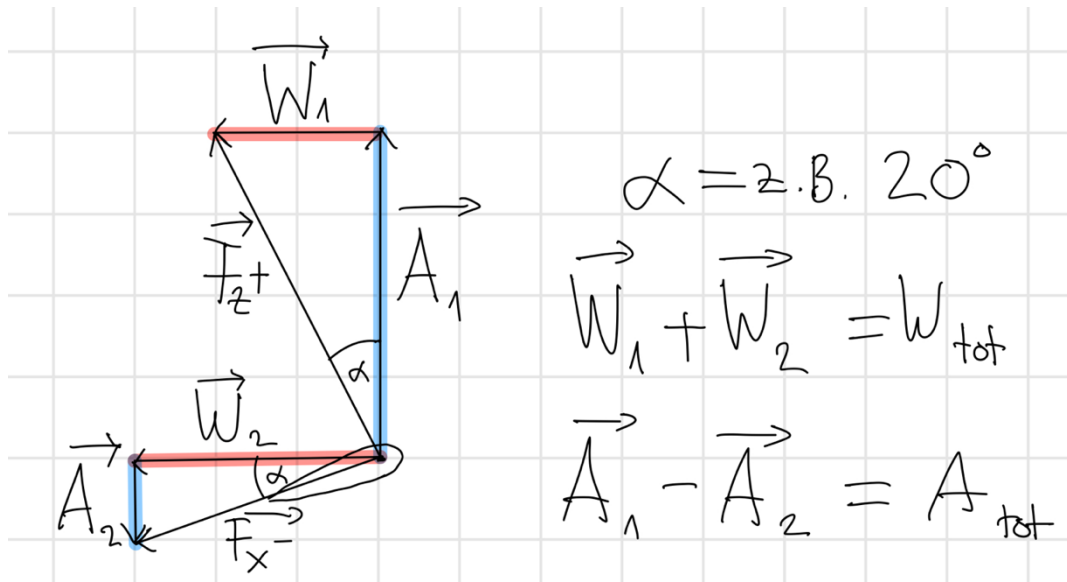


Abbildung 25: schematische Darstellung der Auftriebs- und Widerstandskomponenten

- Widerstand: $F_z \times \sin(\alpha) + F_x \times \cos(\alpha)$; $\alpha = \text{Anstellwinkel}$

Es werden die jeweiligen Komponenten des Widerstands aus den Kräften F_x und F_z berechnet und summiert, da beide Vektoren in die gleiche Richtung, nämlich mit der Strömungsrichtung nach hinten, zeigen

- Auftrieb: $F_z \times \cos(\alpha) - F_x \times \sin(\alpha)$; $\alpha = \text{Anstellwinkel}$

Es werden die jeweiligen Komponenten des Auftriebs aus den Kräften F_z und F_x berechnet und subtrahiert, da die Vektoren in unterschiedliche Richtung zeigen.

Nach diesen Berechnungen konnten die Auftriebs- und Widerstandskraft in einer Tabelle übersichtlich dargestellt und die C_D - und C_L - Werte für die Kräfte berechnet werden. Die Berechnung erfolgte mithilfe des dynamischen Drucks, der in der ZHAW im Windkanal gemessen wurde, und der projizierten Flügelfläche, die für beide Flügel 0.017 m^2 betrug.

4 Resultate und Diskussion

4.1 Resultate KRW

Nach dem Messen der Kräfte und den nötigen Nachbearbeitungen konnten die Resultate der Messungen beider Flügel an der KRW in einem Polardiagramm dargestellt werden. Leider konnten nur auf der höchsten Geschwindigkeitsstufe des Windkanals für jeden Anstellwinkel Kräfte gemessen werden. Die Ergebnisse des Versuchs an der KRW sind auf dem Diagramm 1 ersichtlich. Im Diagramm sind auch die Fehlerbalken in schwarz eingezeichnet.

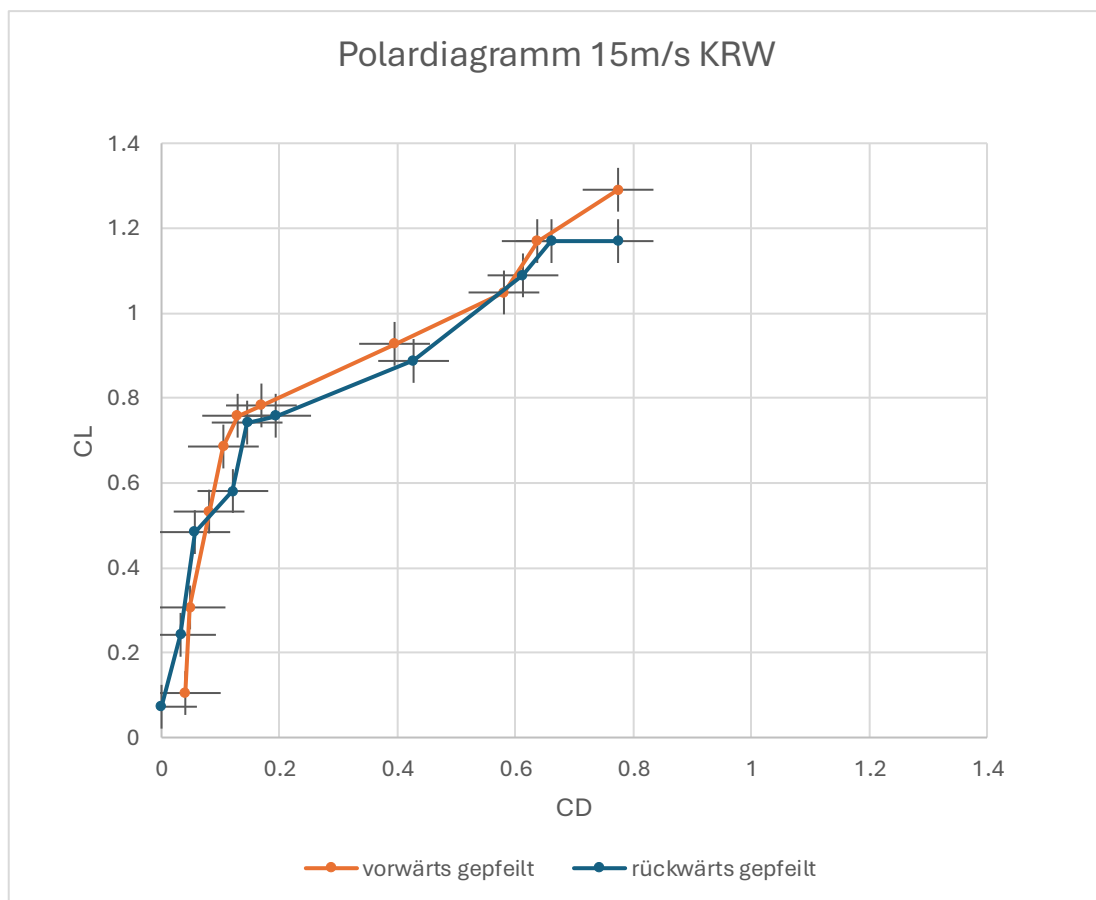


Diagramm 1: Polardiagramm für 15m/s KRW

4.2 Analyse Versuch KRW

Wie auf dem Diagramm zu sehen ist, liegen die Werte der beiden Flügel ziemlich nahe zusammen. Man sieht aber, dass der C_L -Wert des positiv gepfeilten Flügel bei C_D -Werten ab 0.66 stagniert. Beim negativ gepfeilten Flügel lässt sich ein solches Stagnieren nicht beobachten. Es ist lediglich eine leichte Abnahme der Steigung ersichtlich. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass sich der positiv gepfeilte Flügel schon im Prozess des Strömungsabrisses befindet, während dies beim negativ gepfeilten Flügel nicht ersichtlich oder nicht sehr stark ausgeprägt ist. Diese Erkenntnis stimmt mit den Aussagen aus der konsultierten Literatur überein.

Ausserdem liegen die Werte beider Flügel, abgesehen vom letzten Wert, sehr nahe beieinander und innerhalb der berechneten Fehlertoleranzen. Ausser den Unterschieden beim Strömungsabriss verhalten sich die Flügel sehr ähnlich.

4.3 Resultate ZHAW

Die Ergebnisse der Messungen der ZHAW wurden mit Geschwindigkeiten von 10 m/s, 15 m/s und 20 m/s durchgeführt. Gemessen wurde mit Anstellwinkeln von 0° bis 25° . Insgesamt wurden mit jedem Flügel 30 Messungen durchgeführt. Nachfolgend sehen Sie die Ergebnisse dieser Messungen als Polardiagramme dargestellt. Der Auftriebsbeiwert C_L ist auf der Y-Achse dargestellt, der Widerstandsbeiwert C_D wird auf der X-Achse dargestellt.

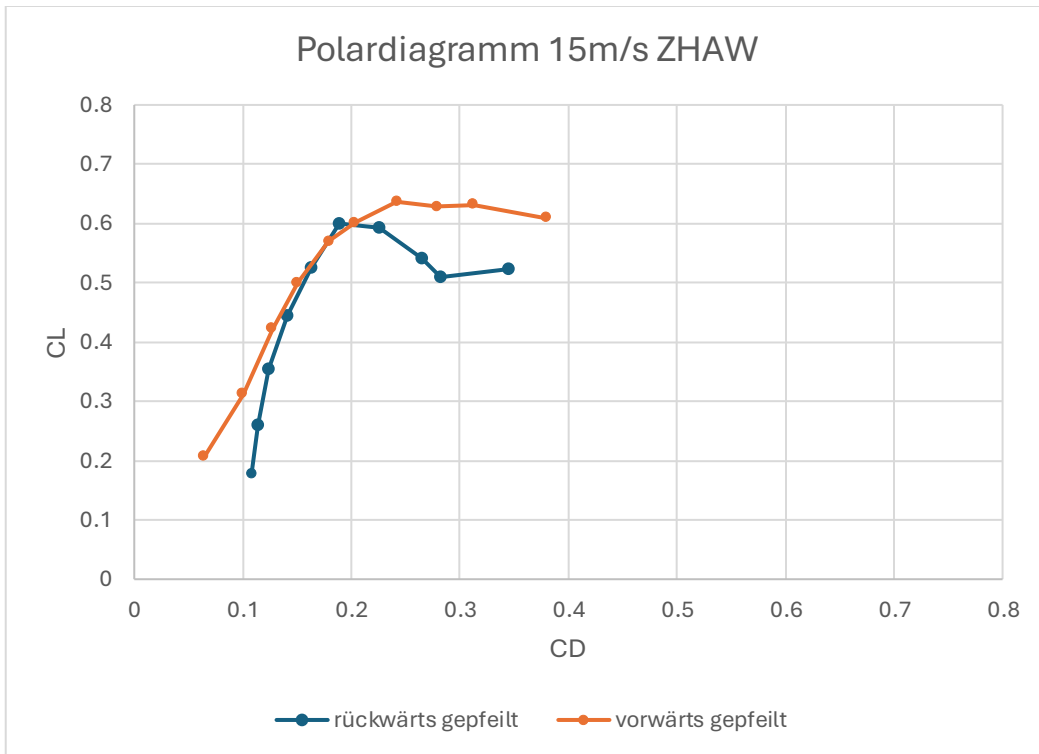


Diagramm 2: Polardiagramm für 15m/s ZHAW

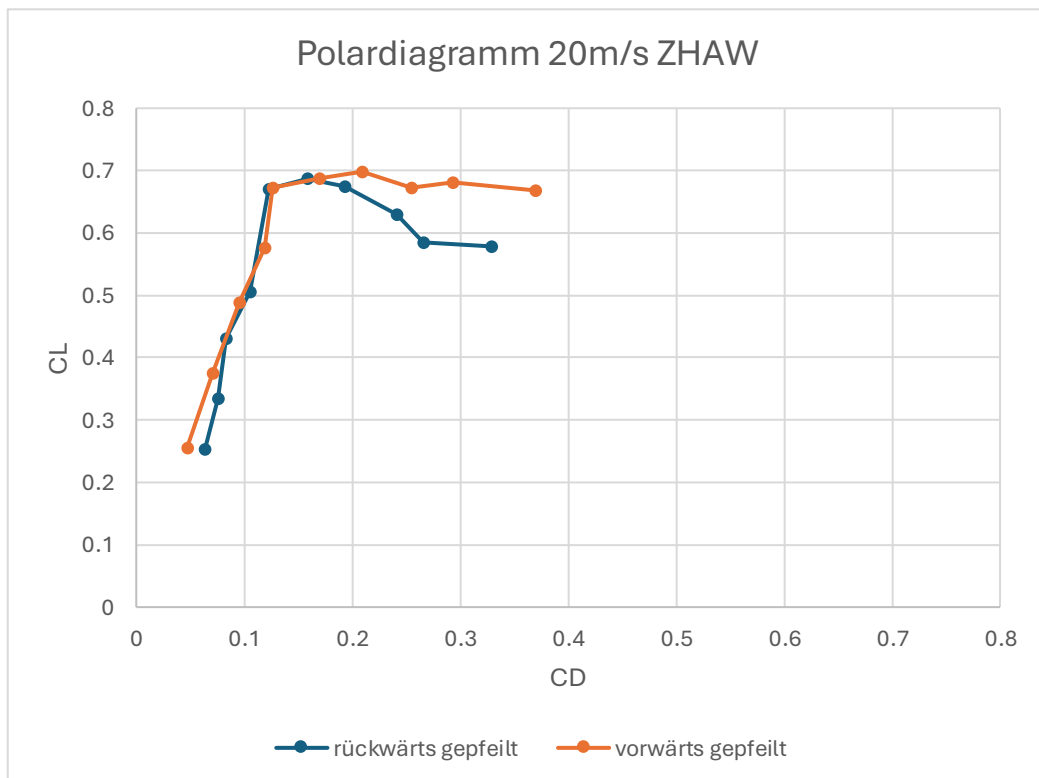


Diagramm 3: Polardiagramm für 20m/s ZHAW

4.4 Analyse Versuch ZHAW

Bei der Betrachtung der Polardiagramme fallen Unterschiede zwischen den beiden Flügeln auf. Es ist ersichtlich, dass der Strömungsabriss beim rückwärts gepfeilten Nurflügler deutlich stärker eintritt als beim vorwärts gepfeilten Nurflügler. Dies ist bei allen getesteten Geschwindigkeiten ersichtlich. Beim Polardiagramm für 15 m/s sieht man beispielsweise, dass es grosse Unterschiede zwischen C_L -Werten der beiden Flügel bei einem C_D -Wert von ca. 0.3 gibt. Beim rückwärts gepfeilten Flügel lässt sich ein C_L -Wert von knapp über 0.5 ablesen, beim vorwärts gepfeilten Flügel kann man hingegen einen Wert von über 0.6 herauslesen. Dies zeigt, dass der vorwärts gepfeilte Flügel für den gleichen Widerstandsbeiwert einen grösseren Auftriebsbeiwert hat als der rückwärts gepfeilte. Somit lässt sich die Aussage treffen, dass der vorwärts gepfeilte Flügel unter gleichen Bedingungen bei gleichem Widerstand einen grösseren Auftrieb erzeugt und somit effizienter ist. Dies ist aber nur beim Strömungsabriss so. Unter normalen Verhältnissen und tiefen Anstellwinkeln sind die Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte der beiden Nurflügler sehr ähnlich. Nur beim Strömungsabriss lassen sich Unterschiede erkennen. Der Strömungsabriss findet beim positiv gepfeilten Flügel etwa am gleichen Punkt statt, beim positiv gepfeilten Nurflügler ist der Strömungsabriss aber deutlich stärker ausgeprägt als beim negativ gepfeilten Flügel.

Bei allen getesteten Geschwindigkeiten und im Bereich von hohen Anstellwinkeln kann man erkennen, dass der rückwärts gepfeilte Flügel bei einer Erhöhung des Anstellwinkels logischerweise einen höheren Widerstandsbeiwert zur Folge hat. Jedoch sinkt gleichzeitig auch der Auftriebsbeiwert, was eindeutig auf einen Strömungsabriss hindeutet. Die Flügel würden an einem gewissen Punkt und ohne sofortiges Handeln der Piloten nicht mehr den benötigten Auftrieb erzeugen und somit das Flugzeug in ein unkontrolliertes Trudeln bringen.

Neben den Unterschieden im Bereich von grösseren Widerstandsbeiwerten sind sich die beiden Flügel bezüglich ihres Verhältnisses von Auftriebs- zu Widerstandsbeiwert ähnlich. Diese Aussage lässt sich auf alle getesteten Geschwindigkeiten übertragen.

4.5 Fehleranalyse

Die Fehleranalyse für die Messresultate vom Windkanal der KRW wurde folgendermassen gestaltet: Nach der Durchführung der eigentlichen Messungen wurden einige Kontrollmessungen erhoben. Für diese Kontrollmessungen wurden die beiden Beiwerte errechnet und die Abweichungen zwischen den Kontrollmessungen und den tatsächlichen Messungen ermittelt und analysiert. Es ergab sich eine durchschnittliche Abweichung von 0.06 beim Widerstandsbeiwert und eine Abweichung von 0.05 für den Auftriebsbeiwert. Diese ermittelten Daten konnten dann als Fehlerbalken im Diagramm dargestellt werden.

4.6 Vergleich zwischen beiden Windkanälen

Nach den einzelnen Analysen folgt ein kurzer Vergleich zwischen den Resultaten aus dem Windkanal der ZHAW und aus dem Windkanal der Schule:

Beide Resultate haben gewissermassen den gleichen Verlauf und bilden die in der Literatur erwähnten Unterschiede zwischen den Flügeln gut ab. Die Unterschiede zwischen den Flügeln beim Strömungsabriss sind im Windkanal der ZHAW grösser als im Windkanal der Schule. Nicht nur die Kräfte konnten an der ZHAW professioneller gemessen werden. Die Daten der Luftdichte, eine genaue Angabe der Geschwindigkeit und das Messen des dynamischen Druckes standen an der ZHAW mit den Ergebnissen zur Verfügung, während beim Windkanal in der Schule auf Wetter-Datenbanken und separate Messungen zur Windgeschwindigkeit zurückgegriffen werden musste.

Etwas eigenartig sind die grossen Unterschiede der Beiwerte zwischen den beiden Windkanälen. Die Beiwerte der Messungen vom Windkanal der KRW sind deutlich grösser als jene der Messungen vom Windkanal der ZHAW.

4.7 Rekapitulieren der Hypothesen

Es ist sehr erfreulich zu sehen, dass sich die meisten zuvor aufgestellten Hypothesen bewahrt haben.

- Bei niedrigen Anstellwinkeln ist mit ähnlichen Ergebnissen zwischen den beiden Flügeln zu rechnen → Diese Hypothese konnte bestätigt werden

Bei allen durchgeführten Messungen konnten bei niedrigen Anstellwinkeln keine fundamentalen Unterschiede zwischen den beiden Flügeln beobachtet werden.

- Bei höherem Anstellwinkel ab 15° wird erwartet, dass der negativ gepfeilte Flügel bezüglich der Widerstandskraft tiefere und bezüglich der Auftriebskraft höhere Kräfte als der positiv gepfeilte Flügel aufweist, da der Strömungsabriss beim positiv gepfeilten Flügel an den Flügelspitzen früher eintritt. Dieser Strömungsabriss hat einen drastischen, negativen Einfluss auf die beiden Kräfte.
→ Diese Hypothese konnte teilweise bestätigt werden

Die Unterschiede beim Strömungsabriss können zwar bestätigt werden, jedoch sind die Resultate nicht bei allen Messungen eindeutig. Ausserdem kann keine Aussage über den Strömungsabriss bezüglich des Anstellwinkels getroffen werden, da die Flügel unabhängig vom Anstellwinkel miteinander verglichen wurden.

- Die Messungen der ZHAW liefern präzisere Resultate als die Messungen an der Schule
→ Diese Hypothese konnte bestätigt werden

Die Messungen an der ZHAW lieferten genauere Resultate und kleinere Fehlerquellen. Trotzdem wurden in beiden Windkanälen die erwarteten Resultate erhalten.

- In beiden Windkanälen lassen sich ähnliche Resultate beobachten

Der Prozess des Strömungsabrisses beim negativ gepfeilten Flügel trat im Gegensatz zum positiv gepfeilten Flügel in deutlich abgeschwächter Form auf. Dies liess sich besonders gut bei den Messungen der ZHAW erkennen. Die Messungen im Windkanal an der Schule lieferten ebenfalls Ergebnisse, jedoch sind die Unterschiede hier kleiner.

4.8 Nicht berücksichtigte Fehlerquellen

Insgesamt wurde versucht, die Fehlerquellen so klein wie möglich zu halten. Fehlerquellen wie die Vibration der Messapparatur spielten eine sekundäre Rolle, da beide Flügel unter den gleichen Bedingungen getestet wurden und die Werte lediglich als Vergleichswerte dienten. Auch die Anbringung der Flügel in einem Anstellwinkel von exakt 0° konnte als Fehlerquelle eliminiert werden, da die Daten in Polardiagrammen dargestellt wurden und damit nur indirekt vom Anstellwinkel abhängig sind.

Bei den Messungen an der ZHAW konnte der Anstellwinkel ebenfalls nicht genau bestätigt werden. Dieses Problem wurde aber erkannt und eliminiert, in dem die Resultate als Polardiagramme ohne Bezug zum Anstellwinkel dargestellt wurden. Ausserdem könnte die aufwändige Nachbearbeitung der Daten der ZHAW eine Fehlerquelle darstellen. Um dieses Risiko zu vermindern, wurden einige Daten von beiden Nurflüglern stichprobenartig ausgewählt und alle Werte dafür manuell durchgerechnet. Anschliessend wurden die ermittelten Resultate mit den in Excel berechneten Daten verglichen und auf Fehler überprüft. Es sind keine Unstimmigkeiten aufgefallen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Zusammenfassen der Ergebnisse

Das Ziel der Arbeit war es, die Auftriebs- und Widerstandskräfte zweier Flügel zu messen und damit Aussagen über das aerodynamische Verhalten der beiden Flügel zu treffen. Einerseits wurde ein nach hinten gerichteter, positiv gepfeilter Flügel untersucht, andererseits ein nach vorne gerichteter, negativ gepfeilter Flügel. Diese Messungen wurden im Windkanal an der KRW und im professionellen Windkanal der ZHAW durchgeführt. Für die Messungen an der KRW musste eine passende Halterung mit Federkraftwaagen entworfen werden. Der einfache Messaufbau ermöglichte mithilfe von 1 N und 5 N – Federkraftwaagen genaue Messungen der Auftriebs- und Widerstandskräfte. Für die Versuche im Windkanal an der ZHAW mussten einige Anpassungen vorgenommen werden, um die Versuche dort durchführen zu können. Nach einigen Komplikationen konnten in beiden Windkanälen die Messungen durchgeführt und die Daten ausgewertet werden. Die erhaltenen Ergebnisse sind sehr erfreulich und bilden die erwarteten Resultate weitgehend ab. Sowohl die Messungen im Windkanal der Kantonsschule Rychenberg als auch die Messungen im Windkanal der ZHAW lieferten gute Resultate. Nach der Nachbearbeitung der Daten konnte die Analyse durchgeführt werden. Die Resultate dieser Analyse sind optimal und stimmen mit den aufgestellten Hypothesen grösstenteils überein. Nach der Betrachtung der Resultate kann man zusammenfassend sagen, dass beim rückwärts gepfeilten Flügel ein deutlich ausgeprägter Strömungsabriss als beim vorwärts gepfeilten Flügel erkennbar ist. Diese Aussage lässt sich zu allen gemessenen Geschwindigkeiten und für beide Windkanäle treffen. Die Darstellung der Resultate in Polardiagrammen ermöglicht es, präzise Aussagen über die Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte zu treffen

5.2 Ausblick: Relevanz in der Zukunft

Die in der Literatur angegebenen Vorteile eines Flügels mit negativer Pfeilung gegenüber einem Flügel mit positiver Pfeilung konnten im Versuch bestätigt werden. Für normale Verkehrsflugzeuge bringen negativ gepfeilte Flügel jedoch keine Vorteile, da die Flügel von Verkehrsflugzeugen nie hohen Anstellwinkeln nahe am Strömungsabriss ausgesetzt werden. Ausserdem bleibt das schon angesprochene strukturelle Problem, welches aber mit Verbundwerkstoffen behoben werden kann. Für die Militärluftfahrt könnten negative Pfeilungen interessant sein. Ebenso für Geschäftsflugzeuge, deren Flügelkasten hinter die Kabine verlegt werden könnte.

Dieser Versuch könnte weitergeführt werden, indem die Modelle grösser skaliert werden, um grössere und verlässlichere Unterschiede zwischen den beiden Pfeilungsrichtungen zu erhalten. Ausserdem wäre es sehr spannend, die Flügelmodelle höheren Geschwindigkeiten auszusetzen, um Unterschiede des aerodynamischen Verhaltens zwischen den beiden Pfeilungsrichtungen in höheren Geschwindigkeitsbereichen zu untersuchen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei einigen Personen bedanken, die mir bei meiner Arbeit zur Seite standen.

Ein grosses Dankeschön geht an Herrn Caglioti von der ZHAW, der sich sehr viel Zeit genommen hat, den Versuch im Windkanal der ZHAW mit mir durchzuführen.

Weiter möchte ich mich bei Herrn Bertschi, dem Physikmechaniker der Schule, bedanken. Er hat mir mit dem Umgang mit dem 3D-Drucker sehr geholfen. Ausserdem stand er mir bei generellen Problemen sowie den Befestigungskomplikationen an der ZHAW immer zur Seite und konnte mir gut helfen.

Ausserdem möchte ich mich bei meiner Betreuungsperson, Herr Meier Trüllinger, für das Betreuen meiner Arbeit herzlich bedanken. Er stand mir bei den Versuchen im Windkanal der KRW zur Seite und kam an die ZHAW, um bei den Versuchen im Windkanal dabei zu sein.

6 Anhang: Ausmessen des Windkanals:

6.1 Überlegungen und Versuchsaufbau

Aufgrund der Tatsache, dass die konstruierten Flügel im Windkanal an der Schule getestet wurden und keine Daten zu den Geschwindigkeiten im Windkanal vorlagen, mussten zu Beginn der Arbeit die Windgeschwindigkeiten im Windkanal gemessen werden. Für diese Arbeit war dieser Schritt sehr wichtig, da erst mit den zu erwartenden Windgeschwindigkeiten ein adäquater Flügel konstruiert werden konnte.

Die Windgeschwindigkeit im Windkanal kann durch verschiedene Antriebsstufen des Elektromotors verändert werden. Der Elektromotor deckt die Stufen 1-70 ab. Um einen sinnvollen Geschwindigkeitsbereich abzudecken, wurden die Antriebsstufen 40, 55 und 70 ausgewählt. Der Auslass des Gebläses besitzt mit dem grössten Aufsatz einen Durchmesser von 19.5 cm. Weil ein Eindruck vom gesamten Strömungsfeld wichtig war, wurden 17 Punkte entsprechend der Abbildung 26 ausgewählt. So konnten die Messwerte in der Mitte sowie am Rand des Strömungsfeldes verglichen werden. So bekam man einen Eindruck, wie die Geschwindigkeiten im Strömungsfeld variieren. Der Versuchsaufbau wurde vorwiegend mit Stativstangen, Muffen und Tischklammern gestaltet. Hinzu kam das eigentliche Messgerät. Dieses besteht, wie Sie auf Abbildung 27 sehen können, aus einem Röhrchen sowie einer druckbasierten Geschwindigkeitsanzeige. Mit dem einfachen Aufbau kann gut punktuell gemessen werden.

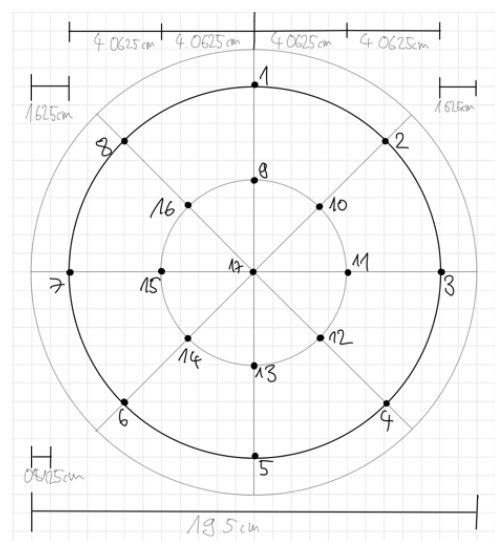


Abbildung 26: Messpunkte 1-17



Abbildung 27: Messaufbau für die Messungen der Windgeschwindigkeiten

6.2 Resultate

Die Resultate der Messungen werden in einem Diagramm folgendermassen dargestellt: auf der x-Achse zu sehen sind die Windgeschwindigkeiten. Auf der y-Achse sind die Punkte 1-17 abgebildet. Die Messungen wurden in einem Abstand von 21 cm zum Auslass des Windkanals durchgeführt.

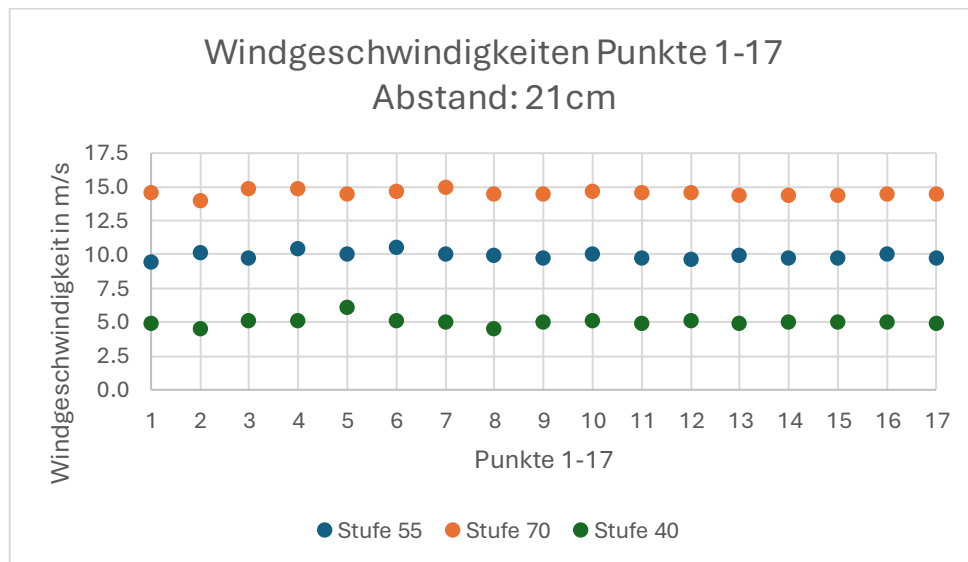


Diagramm 4: Windgeschwindigkeiten für die Punkte 1-18 bei 3 verschiedenen Antriebsstufen

6.3 Interpretation

Bei der Betrachtung des Diagramms kann man eine gute Konsistenz der Werte zwischen den einzelnen Punkten feststellen. Die Differenzen zwischen den Punkten sind nicht gross. Bei Stufe 40 liegt der Geschwindigkeitsdurchschnitt zwischen den Punkten bei ≈ 5 . Bei Stufe 55 liegt der Durchschnitt bei ≈ 10 . Bei der höchsten Stufe liegen die Werte etwas unter den gewollten Werten von 15 m/s bei ≈ 14.6 . Die Werte konnten mit einer Genauigkeit von 0.1 m/s abgelesen werden.

Dank der erhobenen Werte für die Geschwindigkeiten konnten die Messungen später durchgeführt und analysiert werden. Denn wie Sie wissen, ist die Kenntnis über die Geschwindigkeit für die Berechnung der Auftriebs- und Widerstandsbeiwerten essenziell.



Abbildung 28: Geschwindigkeitsanzeige des Messgeräts

7 Literaturverzeichnis

7.1 Primärliteratur

- John D. Anderson, Jr., Fundamentals of Aerodynamics, New York, Mc Graw-Hill, 2011, fifth edition
- Daniel P. Raymer, Aircraft Design: A conceptual approach, (Playa del Rey (Kalifornien)), American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2012, fifth edition

7.2 Internetquellen

- Fliegermagazin, Strömungsabriss, 2011 (Bearbeitet 2020),
URL: <https://www.fliegermagazin.de/wissen/stroemungsabriss/>
Datum der Abfrage: 4. November 2024
- Seite „Airbus A380“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie.
Bearbeitungsstand: 19. September 2024
URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Airbus_A380&oldid=248728025
Datum der Abfrage: 25. September 2024
- Seite „Pfeilung“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie.
Bearbeitungsstand: 29. August 2024
URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Pfeilung&oldid=248135439>
Datum der Abfrage: 25. September 2024
- Seite „Grumman X-29“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie.
Bearbeitungsstand: 12. August 2024
URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Grumman_X-29&oldid=247635651
Datum der Abfrage: 25. September 2024
- Seite «Aeroelasticity» (Englisch). In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie
Bearbeitungsstand 29. August 2024
URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aeroelasticity>
Datum der Abfrage: 17. September 2024
- Seite „Messerschmitt Me 262“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie.
Bearbeitungsstand: 16. September 2024

URL: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Messerschmitt Me 262&oldid=248648923](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Messerschmitt_Me_262&oldid=248648923)

Datum der Abfrage: 25. September 2024

- Seite „Junkers Ju 287“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie.

Bearbeitungsstand: 12. August 2024

URL: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Junkers Ju 287&oldid=247635287](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Junkers_Ju_287&oldid=247635287)

Datum der Abfrage: 25. September 2024

- Seite „HFB 320“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie.

Bearbeitungsstand: 1. April 2024

URL: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=HFB 320&oldid=243655250](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=HFB_320&oldid=243655250)

Datum der Abfrage: 25. September 2024

- Seite «wing box»(Englisch). In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie

Bearbeitungsstand: 31. August 2024

URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wingbox>

Datum der Abfrage: 22. September 2024

- Strömungswiderstand und C_W -Wert, Leifiphysik, Joachim Herz Stiftung

URL:<https://www.leifiphysik.de/mechanik/stroemungslehre/grundwissen/stroemungswiderstand-und-cmw-wert>

Datum der Abfrage: 13. Oktober 2024

- Dynamischer Auftrieb und C_A -Wert, Leifiphysik, Joachim Herz Stiftung

URL:<https://www.leifiphysik.de/mechanik/stroemungslehre/grundwissen/dynamischer-auftrieb-und-cma-wert>

Datum der Abfrage: 14. Oktober 2024

- Seite „Strömungsabriss“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 22. September 2024

URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Str%C3%B6mungsabriss&oldid=248814432>

Datum der Abfrage: 2. November 2024

- Supmea: Statischer Druck vs. Dynamischer Druck vs. Gesamtdruck, 2023

URL: <https://de.supmeaauto.com/training/static-pressure-vs-dynamic-pressure-vs-total-pressure>

Datum der Abfrage: 23. November 2024

Die zur Berechnung des Auftriebsbeiwerts und des Widerstandsbeiwerts verwendeten Daten und Quellen für das Errechnen des dynamischen Drucks:

- <https://www.winti-wetter.ch/> , Daten des 07.10.24 (Unter Statistik/Statistik Daten/07.10.24),
Datum der Abfrage: 09. Oktober 2024
- <https://wind-data.ch/tools/luftdichte.php>, Berechnung der Luftdichte rho,
Datum der Abfrage: 09. Oktober 2024

von winti-wetter.ch entnommene und verwendete Daten:

- Temperatur (Tagesdurchschnitt): 14.62 ° C
- Luftdruck (Tagesdurchschnitt): 1008.8 → 1009 hPa
- Luftfeuchtigkeit (abgelesen aus Tabelle (Zeitpunkt: ca. 10:00)): 97%

(Höhe Winterthur: 439 m)

➔ Luftdichte = 1.214 kg/m³

7.3 Abbildungsverzeichnis

- Titelblatt: Screenshots von positiv und negativ gepfeiltem Nurfügler in onshape
Eigene Abbildung
- Abbildung 1: A350 von Lufthansa
URL:<https://newsroom.lufthansagroup.com/lufthansa-airbus-a350-900-in-hamburg-gelandet/>
Datum der Abfrage: 17. November 2024
- Abbildung 2: Cessna 208 Caravan
URL:<https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2016/december/pilot/turbine-pilot-quick-look-cessna-208>
Datum der Abfrage: 17. November 2024
- Abbildung 3: HFB 320
URL:<https://www.flight-manuals-online.com/wp-content/uploads/2017/02/HFB320-photo.jpg>
Datum der Abfrage: 17. November 2024
- Abbildung 4: Vorderkantenpfeilung
URL:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a0/Pfeilung_Vorderkante-Hinterkante.svg/1200px-Pfeilung_Vorderkante-Hinterkante.svg.png
Datum der Abfrage: 2. November 2024
- Abbildung 5: Veranschaulichung der auf ein fliegendes Flugzeug wirkenden Kräfte Vortrieb, Auftrieb, Widerstand und Gewicht
URL: <https://www.lavionnaire.fr/AllAerodynamik.php>
Datum der Abfrage: 16. Oktober 2024
- Abbildung 6: Anstellwinkel einer Tragfläche
URL:<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/40/SketchAngleOfAttack.svg>
Datum der Abfrage: 1. November 2024
- Abbildung 7: typisches Polardiagramm
URL: https://systemdesign.ch/images/f/f4/Polardiagramm_LDP.gif
(bearbeitet)
Datum der Abfrage 17. November 2024

- Abbildung 8: (v.l.n.r.): negativ gepfeilte Tragfläche, ungepfeilte Tragfläche, positiv gepfeilte Tragfläche
 URL:<https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780128184653000094-f09-20-9780128184653.jpg>, (bearbeitet)
 Datum der Abfrage: 24. September 2024
- Abbildung 9: Me 262 auf dem Flugplatz Dübendorf https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a6/Bundesarchiv_Bild_141-2497%2C_Flugzeug_Me_262A_auf_Flugplatz.jpg, Bundesarchiv Bild 141-2497,
 Datum der Abfrage: 22. September 2024
- Abbildung 10: Aufteilung der Strömung bei gepfeiltem Flügel <https://cdn.boldmethod.com/images/learn-to-fly/aerodynamics/wing-sweep/spanwise-flow.jpg>, boldmethod, Why Do Fast Aircraft Have Swept Wings? (bearbeitet)
 Datum der Abfrage: 24. September
- Abbildung 11: Fluss der Strömung bei positiv und negativ gepfeilter Tragflächen
 URL:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Airflow_forward_and_backward_swept_aircraft.jpg
 Datum der Abfrage: 1. November 2024
- Abbildung 12: Seitenansicht der Ju-287
 URL:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/88/Junkers_Ju_287_V1_side_view.jpg, Seitenansicht der Junkers Ju 287 V1 bei Brandis,
 Datum der Abfrage: 22.09.24
- Abbildung 13: HFB 320 Hansa Jet https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a8/Hamburger_Flugzeugbau_HFB-320_Hansa_Jet%2C_Germany_-_Air_Force_AN1869171.jpg, Mike Freer-touchdown-aviation
 Datum der Abfrage: 22.09.24
- Abbildung 14: Platzierung der «wing box» bei Privatjets
 Aircraft Design: A conceptual approach (Fifth Edition) von Daniel P. Raymer (bearbeitet)
- Abbildung 15: negativ gepfeilter Flügel im CAD-Programm
 Eigene Abbildung
- Abbildung 16: positive gepfeilter Flügel für Versuche an der KRW
 Eigene Aufnahme
- Abbildung 17: Seitenansicht des Windkanals der KRW

Eigene Aufnahme

- Abbildung 18: Einlass mit Elektromotor des Windkanals der KRW

Eigene Aufnahme

- Abbildung 19: Schematische Darstellung Wabenstruktur

URL: <https://www.tubus-bauer.com/en/application/laminar-airflow/>, Tubus Bauer GmbH (©2020) (bearbeitet)

Datum der Abfrage: 1. September 2024

- Abbildung 20: Versuchsaufbau mit eingespanntem Flügel, Windkanal inaktiv, Widerstandsmessung

Eigene Aufnahme

- Abbildung 21: Versuchsaufbau mit eingespanntem Flügel, Windkanal aktiv, Widerstandsmessung

Eigene Aufnahme

- Abbildung 22: Windkanal ALFA der ZHAW

URL:https://www.zhaw.ch/storage/_processed_/5/3/csm_Windkanal-ZAV_123ab4d065.webp

Datum der Abfrage: 21. November 2024

- Abbildung 23: positiv gepfeilter Nurflügler für die Versuche an der ZHAW

Eigene Aufnahme

- Abbildung 24: negativ gepfeilter Flügel mit Adapter an der Waage der ZHAW befestigt

Eigene Aufnahme

- Abbildung 25: Schematische Darstellung der Auftriebs- und Widerstandskomponenten

Eigene Abbildung

- Abbildung 26: Messpunkte 1-18

Eigene Abbildung

- Abbildung 27: Messaufbau für die Messungen der Windgeschwindigkeiten

Eigene Aufnahme

- Abbildung 28: Geschwindigkeitsanzeige des Messgeräts

Eigene Aufnahme

- Diagramm 1: Polardiagramm für 15m/s KRW

Eigene Abbildung

- Diagramm 2: Polardiagramm für 15m/s ZHAW

Eigene Abbildung

- Diagramm 3: Polardiagramm für 20m/s ZHAW

Eigene Abbildung

- Diagramm 4: Windgeschwindigkeiten für die Punkte 1-18 bei drei verschiedenen Antriebsstufen

Eigene Abbildung

8 Rohdaten

8.1 Rohdaten KRW

Messungen KRW:

deg	m/s	rückwärts		vorwärts	
		A	W	A	W
0	5.01	0.00	0.00	0.00	0.00
2.5	5.01	0.00	0.00	0.00	0.00
5	5.01	0.00	0.00	0.00	0.00
7.5	5.01	0.00	0.00	0.00	0.00
10	5.01	0.00	0.00	0.00	0.00
12.5	5.01	0.00	0.00	0.05	0.00
15	5.01	0.03	0.02	0.08	0.00
17.5	5.01	0.06	0.04	0.09	0.03
20	5.01	0.10	0.09	0.11	0.05
25	5.01	0.09	0.09	0.14	0.10
0	9.93	0.00	0.00	0.00	0.00
2.5	9.93	0.03	0.00	0.00	0.00
5	9.93	0.14	0.00	0.09	0.00
7.5	9.93	0.21	0.00	0.17	0.00
10	9.93	0.28	0.00	0.28	0.00
12.5	9.93	0.33	0.00	0.37	0.02
15	9.93	0.45	0.04	0.46	0.06
17.5	9.93	0.48	0.09	0.51	0.10
20	9.93	0.54	0.26	0.57	0.25
25	9.93	0.55	0.33	0.64	0.30
0	14.56	0.09	0.00	0.13	0.05
2.5	14.56	0.30	0.04	0.38	0.06
5	14.56	0.60	0.07	0.66	0.10
7.5	14.56	0.72	0.15	0.85	0.13
10	14.56	0.92	0.18	0.94	0.16
12.5	14.56	0.94	0.24	0.97	0.21
15	14.56	1.10	0.53	1.15	0.49
17.5	14.56	1.35	0.76	1.30	0.72
20	14.56	1.45	0.82	1.45	0.79
25	14.56	1.45	0.96	1.60	0.96

Kontrollmessungen KRW Widerstand: Hebelgesetz angewendet

deg	v	vorwärts	rückwärts	
	0	5.01	0.00	0.00
	5	5.01	0.00	0.00
	10	5.01	0.00	0.00
	15	5.01	0.00	0.00
	20	5.01	0.03	0.06
	25	5.01	0.08	0.08
	0	9.93	0.00	0.00
	5	9.93	0.00	0.00
	10	9.93	0.00	0.00
	15	9.93	0.05	0.07
	20	9.93	0.09	0.11
	25	9.93	0.26	0.25
	0	14.56	0.03	0.00
	5	14.56	0.09	0.00
	10	14.56	0.11	0.22
	15	14.56	0.19	0.33
	20	14.56	0.55	0.50
	25	14.56	0.85	0.86

Kontrollmessungen KRW Auftrieb: Hebelgesetz angewendet

deg	v	vorwärts	rückwärts	
	0	5.01	0.00	0.00
	5	5.01	0.00	0.00
	10	5.01	0.00	0.00
	15	5.01	0.08	0.03
	20	5.01	0.09	0.08
	25	5.01	0.14	0.06
	0	9.93	0.00	0.00
	5	9.93	0.11	0.08
	10	9.93	0.24	0.15
	15	9.93	0.46	0.34
	20	9.93	0.48	0.47
	25	9.93	0.61	0.52
	0	14.56	0.05	0.02
	5	14.56	0.52	0.48
	10	14.56	0.80	0.74
	15	14.56	0.99	1.04
	20	14.56	1.26	1.31
	25	14.56	1.46	1.38

8.2 Rohdaten ZHAW

Messungen ZHAW vorwärts gepfeilt

	Anstellwinkel	dyn. Druck			Anstellwin- kel	Flügelflä- che	
m/s	deg	q	Fx	Fz	rad	A in m ²	Fx +
10ms	0	54.3934957	-0.101436	0.165994	0	0.017	0.101436
10ms	2.5	54.3635051	-0.135568	0.234044	0.04363323	0.017	0.135568
10ms	5	54.2978669	-0.135177	0.346482	0.08726646	0.017	0.135177
10ms	7.5	54.2723169	-0.127653	0.430286	0.13089969	0.017	0.127653
10ms	10	54.1474279	-0.131329	0.519301	0.17453293	0.017	0.131329
10ms	12.5	54.0903244	-0.145317	0.516739	0.21816616	0.017	0.145317
10ms	15	54.1007145	-0.120324	0.593065	0.26179939	0.017	0.120324
10ms	17.5	53.8792174	-0.122156	0.595677	0.30543262	0.017	0.122156
10ms	20	53.8657912	-0.121301	0.60454	0.34906585	0.017	0.121301
10ms	25	53.8503595	-0.123965	0.605649	0.43633231	0.017	0.123965
15ms	0	121.826002	-0.133635	0.427377	0	0.017	0.133635
15ms	2.5	121.789911	-0.178477	0.654289	0.04363323	0.017	0.178477
15ms	5	121.658339	-0.185963	0.893061	0.08726646	0.017	0.185963
15ms	7.5	121.64511	-0.174088	1.066789	0.13089969	0.017	0.174088
15ms	10	121.659192	-0.161185	1.224712	0.17453293	0.017	0.161185
15ms	12.5	121.342433	-0.14143	1.302143	0.21816616	0.017	0.14143
15ms	15	121.077482	-0.142694	1.394849	0.26179939	0.017	0.142694
15ms	17.5	120.85411	-0.1587	1.40362	0.30543262	0.017	0.1587
15ms	20	120.560807	-0.159607	1.43663	0.34906585	0.017	0.159607
15ms	25	120.369326	-0.178465	1.45797	0.43633231	0.017	0.178465
20ms	0	217.545846	-0.174065	0.946282	0	0.017	0.174065
20ms	2.5	217.141258	-0.199962	1.393817	0.04363323	0.017	0.199962
20ms	5	217.009099	-0.193367	1.826471	0.08726646	0.017	0.193367
20ms	7.5	216.954639	-0.15567	2.162285	0.13089969	0.017	0.15567
20ms	10	216.503683	-0.029096	2.518583	0.17453293	0.017	0.029096
20ms	12.5	216.551272	-0.063557	2.60686	0.21816616	0.017	0.063557
20ms	15	215.979391	-0.078429	2.675379	0.26179939	0.017	0.078429
20ms	17.5	215.467026	-0.148868	2.63216	0.30543262	0.017	0.148868
20ms	20	215.313321	-0.155571	2.710647	0.34906585	0.017	0.155571
20ms	25	214.634078	-0.19042	2.779068	0.43633231	0.017	0.19042

Messun-
gen
ZHAW

rückwärts
gepeilt

rück- wärts m/s	Anstellwinkel deg	dyn. Druck q	Fx	Fz	Anstellwin- kel rad	Flügelflä- che A in m ²	Fx+
10ms	0	54.41889	-0.173607	0.102013	0	0.017	0.173607
10ms	2.5	54.3070468	-0.151038	0.201346	0.04363323	0.017	0.151038
10ms	5	54.1750332	-0.142661	0.284546	0.08726646	0.017	0.142661
10ms	7.5	54.0628841	-0.128403	0.376873	0.13089969	0.017	0.128403
10ms	10	54.0082001	-0.124448	0.453721	0.17453293	0.017	0.124448
10ms	12.5	53.9535941	-0.114998	0.526457	0.21816616	0.017	0.114998
10ms	15	53.9287611	-0.113715	0.530057	0.26179939	0.017	0.113715
10ms	17.5	53.9613687	-0.131473	0.509342	0.30543262	0.017	0.131473
10ms	20	53.8749643	-0.128288	0.490498	0.34906585	0.017	0.128288
10ms	25	53.7057378	-0.132673	0.52748	0.43633231	0.017	0.132673
15ms	0	121.777104	-0.223621	0.367236	0	0.017	0.223621
15ms	2.5	121.544252	-0.212592	0.547812	0.04363323	0.017	0.212592
15ms	5	121.430161	-0.191358	0.751007	0.08726646	0.017	0.191358
15ms	7.5	121.170263	-0.169318	0.946605	0.13089969	0.017	0.169318
15ms	10	121.166401	-0.142336	1.123937	0.17453293	0.017	0.142336
15ms	12.5	121.145628	-0.112793	1.290625	0.21816616	0.017	0.112793
15ms	15	120.977755	-0.133229	1.298632	0.26179939	0.017	0.133229
15ms	17.5	120.770508	-0.184572	1.223127	0.30543262	0.017	0.184572
15ms	20	120.774641	-0.187339	1.182334	0.34906585	0.017	0.187339
15ms	25	120.415638	-0.187888	1.266868	0.43633231	0.017	0.187888
20ms	0	217.010744	-0.23502	0.936717	0	0.017	0.23502
20ms	2.5	216.908096	-0.222819	1.243185	0.04363323	0.017	0.222819
20ms	5	216.531926	-0.167871	1.607534	0.08726646	0.017	0.167871
20ms	7.5	216.249597	-0.142373	1.894459	0.13089969	0.017	0.142373
20ms	10	216.15561	-0.016728	2.505359	0.17453293	0.017	0.016728
20ms	12.5	215.78766	-0.021639	2.585167	0.21816616	0.017	0.021639
20ms	15	215.685402	-0.044458	2.575012	0.26179939	0.017	0.044458
20ms	17.5	215.380756	-0.148802	2.465914	0.30543262	0.017	0.148802
20ms	20	215.118628	-0.183194	2.345956	0.34906585	0.017	0.183194
20ms	25	214.395435	-0.194348	2.418395	0.43633231	0.017	0.194348

8.3 Rohdaten Windgeschwindigkeiten

Punkt	40	55	70
1	4.9	9.5	14.6
2	4.5	10.1	14.0
3	5.1	9.8	14.9
4	5.1	10.4	14.9
5	6.1	10.0	14.5
6	5.1	10.5	14.7
7	5.0	10.0	15.0
8	4.5	9.9	14.5
9	5.0	9.8	14.5
10	5.1	10.0	14.7
11	4.9	9.8	14.6
12	5.1	9.7	14.6
13	4.9	9.9	14.4
14	5.0	9.8	14.4
15	5.0	9.8	14.4
16	5.0	10.0	14.5
17	4.9	9.8	14.5