

Universität Konstanz
Fachbereich Physik

Hydrofoils Versuche im Strömungskanal

04.10.2011

Projektpraktikum
von

Lukas Ebner
Moritz Futscher
Lukas Schertel

Wir danken allen, die uns durch tatkräftige Unterstützung bei der Realisierung dieses Projektes geholfen haben. Insbesondere danken wir: Herrn Runge für die problemlose Ermöglichung dieses Praktikums. Herrn Kohllöffel, dass er uns immer und überall tatkräftig und mit all seinem Werkzeug zur Seite stand. Thomas Lorentz, für zahlreiche clevere Ideen. Des weiteren wollen wir der Werkstatt danken, die uns den Aufbau des Kanals und die Herstellung der Flügel vereinfacht hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	3
2	Ziel des Versuches	4
3	Grundlagen	4
3.1	Strömungen	4
3.2	laminare Strömung zwischen zwei parallelen Wänden	5
3.3	Auftrieb	7
3.4	Abtrieb	9
3.5	Flügelprofile	10
4	Versuchsaufbau und Durchführung	12
4.1	Entwicklung des Versuchsaufbaus	12
4.2	Strömungskanal	13
4.3	Strömungsgeschwindigkeitsmessung	15
4.4	Messaufbau	15
4.4.1	Auftrieb	15
4.4.2	Abtrieb	16
4.4.3	Elektronische Messung	17
4.5	Flügelprofil	17
4.5.1	Aufhängung der Flügelprofile	18
5	Ergebnisse	18
5.1	Erstellen einer laminaren Strömung	18
5.2	Messungen der Flügelprofile	20
5.2.1	Auftrieb kleiner Flügel ohne Kante	20
5.2.2	Abtrieb kleiner Flügel ohne Kante	21
5.2.3	Auftrieb großer Flügel ohne Kante	22
5.2.4	Abtrieb großer Flügel ohne Kante	24
5.2.5	Vergleich großer und kleiner Flügel	24
5.2.6	Auftrieb mit einer Abrisskante in der Mitte	25
5.2.7	Abtrieb mit einer Abrisskante in der Mitte	27
5.2.8	Auftrieb mit einer Abrisskante hinten	27
5.2.9	Abtrieb mit einer Abrisskante hinten	28
5.2.10	Vergleich Flügel mit und ohne Abrisskanten	29
5.3	Fehler	30
6	Verbesserungsmöglichkeiten	31
7	Fazit	31

1 Motivation

Die Idee zu diesem Versuch kam auf, da die beteiligten Studenten in ihrer Freizeit mit dem Segelsport zu tun haben und aus diesem Hobby die faszinierend scheinenden Hydrofoils bekannt waren. Diese genauer zu untersuchen und mit allgemeinen Strömungsversuchen zu kombinieren schien sehr interessant.

Bei einem Hydrofoil handelt es sich um ein Tragflügelboot, welches bei hoher Geschwindigkeit durch den Auftrieb der unter Wasser liegenden Flügel angehoben wird. Somit verringert sich der Reibungswiderstand und die Verdrängung, wodurch noch schnellere Geschwindigkeiten erreicht werden können.



Abb. 1: Bild eines Hydrofoils (4)

Schon bei geringen Geschwindigkeitsänderungen kann es passieren, dass das Boot zurück ins Wasser absinkt bzw. es aus dem Wasser abhebt. Solche Effekte müssen vermieden werden, da dies sowohl für das Boot als auch für die Insassen gefährlich werden kann. Bei Motorbooten tritt dieses Problem seltener auf, da sich die Geschwindigkeit sehr gut regulieren lassen kann, was bei Segelbooten jedoch nicht unbedingt der Fall ist. Es stellt sich somit die Frage, wie der Auftrieb allein durch die Form des Flügels ungefähr konstant gehalten werden kann.

2 Ziel des Versuches

Mit dem in der Motivation beschriebenen Problem wollen wir uns unter anderem in diesem Versuch beschäftigen. Es werden so mehrere Flügel hergestellt, die unterschiedliche Abrisskanten besitzen um so die Auftriebseigenschaften zu variieren. All diese Flügel sollen in einem Wasserkanal auf Auf- und Abtrieb untersucht werden. Es entstehen dadurch weitere Aufgabenstellungen, wie z.B. die der Herstellung einer laminaren Strömung.

3 Grundlagen

3.1 Strömungen

Eine **stationäre Strömung** liegt vor, wenn die Strömungsgeschwindigkeit v an jedem Ort zeitlich konstant ist. An unterschiedlichen Orten, darf sie jedoch verschieden sein.

Sind die Reibungskräfte in einer Strömung groß gegenüber den beschleunigenden Kräften, so spricht man von einer **laminaren Strömung**. Bildlich gesprochen, ist dies eine Strömung, bei der sich die Stromfäden nebeneinander bewegen ohne sich zu durchmischen.

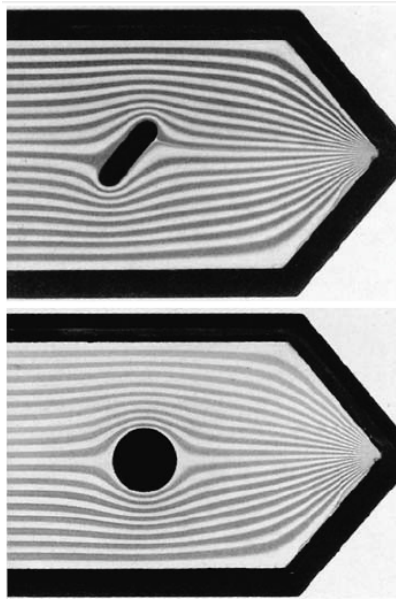


Abb. 2: Bilder einer laminaren Strömung von links nach rechts mit Hindernissen.
(1)

3.2 laminare Strömung zwischen zwei parallelen Wänden

Um eine laminare Strömung zwischen zwei parallelen Wänden erzeugen zu können, muss man eine Kraft der Reibungskraft entgegensetzen. Die Reibungskraft ergibt sich durch:

$$(dF_R)_z = \nu \cdot dV \cdot \Delta u_z \quad (1)$$

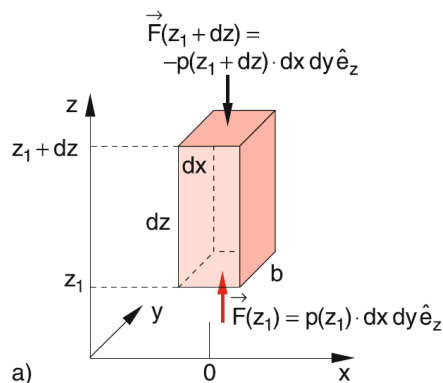


Abb. 3: Flüssigkeitsvolumenelement. (1)

Diese entgegengesetzte Kraft ist die Druckdifferenz zwischen den Ebenen $z = \pm z_0$. Unter der Annahme, dass der Druck nur von z , also der Höhe der Wassersäule abhängt. Das bedeutet, dass der Druck $p(z)$ innerhalb einer Ebene z konstant ist. Betrachten wir nun ein Volumen $dV = dx \cdot dy \cdot dz$. Auf die Flächen $z = z_1$ und $z = z_1 + dz$ wirken folgende Kräfte:

$$dF_1 = dx \cdot dy \cdot p(z_1) \quad \text{und} \quad dF_2 = dx \cdot dy \cdot p(z_1 + dz) \quad (2)$$

Dies fasst sich zu einer Kraft F_z auf ein Volumenelement dV zusammen.

$$dF_z = -dx \cdot dy \cdot \frac{dp}{dz} \cdot dz \quad (3)$$

Wenn wir nun diese Kräfte gleichsetzen, damit die Druckkraft die Reibungskraft gerade kompensiert, muss gelten:

$$\frac{d^2 u_z}{dx^2} = -\frac{1}{\nu} \frac{dp}{dz} \Rightarrow \frac{du_z}{dx} = -\frac{x}{\nu} + C_1 \quad (4)$$

Wobei die Integrationskonstante C_1 die Steigung des Geschwindigkeitsprofils für $x = 0$ angibt. Durch Integration über x erhalten wir:

$$u_z = -\frac{x^2}{2\nu} \frac{dp}{dz} + C_1 x + C_2 \quad (5)$$

Betrachten wir nun eine Strömung zwischen zwei parallelen Platten bei $x = -d$ und $x = d$. Daraus folgt $C_1 = 0$ und $C_2 = \frac{d^2}{2\nu} \frac{dp}{dz}$. Damit erhalten wir für das Geschwindigkeitsfeld der Strömung ein Parabelprofil folgender Form:

$$u(x) = \frac{1}{2\nu} \frac{dp}{dz} (d^2 - x^2) \quad (6)$$

Siehe auch Abb. 4.

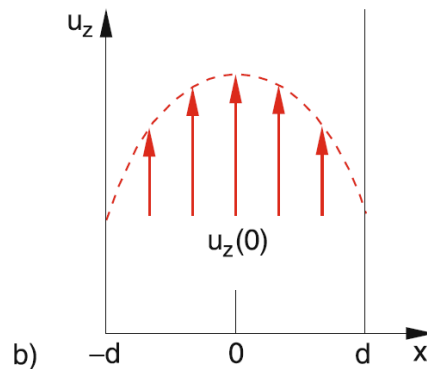


Abb. 4: parabelförmige laminare Strömung. (1)

Wie hier schon zu sehen, ist es nicht möglich in einem Strömungskanal eine Strömung zu erzeugen die vollkommen die gleiche Strömungsgeschwindigkeit an allen Stellen im Kanal hat. Seitlich wird die Strömungsgeschwindigkeit also anders sein als in der Mitte des Kanals. Es wird also nur möglich sein im zeitlichen Mittel eine konstante Strömungsgeschwindigkeit zu messen.

3.3 Auftrieb

Befindet sich ein unsymmetrisches Profil in einer laminaren Strömung, entsteht eine Querkraft, die wir dynamischen Auftrieb nennen.

Bei einem Flügelprofil ist der Weg, den die strömende Flüssigkeit zurücklegen muss auf der Oberseite des Profils länger als auf der Unterseite. Dadurch kommt es zu einer Zirkulationsströmung, die sich mit der laminaren Strömung überlagert, und so zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit v_1 oberhalb des Flügels und zu einer Erniedrigung v_2 unterhalb des Flügels führt.

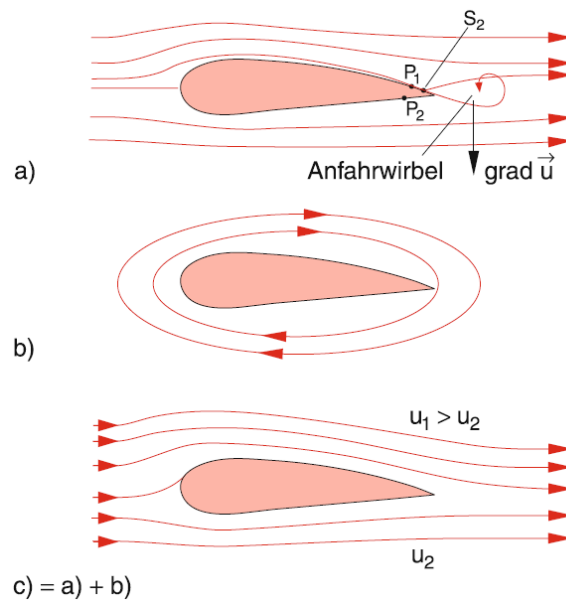


Abb. 5: Entstehung des dynamischen Auftriebs a) ohne Zirkulation b) nur Zirkulation c) Überlagerung (u ist hier die Strömungsgeschwindigkeit). (1)

Mit der Bernoulli-Gleichung ergibt sich dann die Auftriebskraft F_A . Für die Bernoulli-Gleichung gilt:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_0 \quad (7)$$

p_0 ist der Gesamtdruck, p der statische Druck und ρ die Dichte der Flüssigkeit. Für die Auftriebskraft gilt nun:

$$F_A = \Delta p \cdot A = c_A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot A \quad (8)$$

c_A stellt hier den Auftriebsbeiwert dar, der von der Form des Profils abhängt. A ist die Gesamtfläche des Flügels.

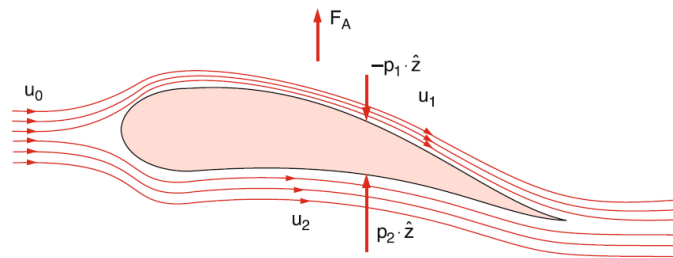


Abb. 6: Skizze zum Auftrieb eines Flügels. (1)

3.4 Abtrieb

Der Abtrieb ist die Widerstandskraft F_W , des umströmten Körpers. Diese ergibt sich aus Addition der Reibungskraft F_R des Körpers mit der ihn umströmenden laminaren Strömung und der Druckwiderstandskraft F_D , die aus der Druckdifferenz zwischen dem Strömungsgebiet vor und hinter dem Körper entsteht.

$$F_W = F_R + F_D \quad (9)$$

Die Widerstandskraft F_W hängt ab von der Querschnittsfläche A des umströmten Körpers und von der Strömungsgeschwindigkeit v , wobei gilt: $F_W \propto v^2$. Mit dem Staudruck p_S erhält man für den Abtrieb:

$$F_W = c_W \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A \quad (10)$$

c_W stellt hier den Widerstandsbeiwert dar, der vom Profil des umströmten Körpers abhängt.









Profil		c_w -Wert
	Stromlinienprofil	0,06
	Tragfläche mit gewölbter Unterseite	0,1
	Tragfläche mit ebener Unterseite	0,2
	hohle Halbkugel	0,3-0,4
	Kugel	0,4
	Halbkugel	0,8
	Scheibe	1,2
	hohle Halbkugel	1,4

Abb. 7: Widerstandsbeiwerte verschiedener Profile. (1)

3.5 Flügelprofile

Bei den von uns verwendeten Flügelprofilen haben wir uns für das NACA 64-412 Profil entschieden. Dieses Profil wird von den meisten foiling Segelbooten verwendet. Die NACA Profile berechnen sich über ein abschnittsweise definiertes Polynom dritten Grades, welche hier nicht weiter behandelt werden sollen. Das Hauptaugenmerk unseres Versuches sollte nicht bei den Auftriebswerten des Profil an sich liegen, sondern bei den Veränderungen durch Einfräsen verschiedener Abrisskanten. In Abb. 7 sieht man die verschiedenen Positionen der Abrisskanten.



Abb. 8: Profil mit einer Abrisskante in der Mitte.



Abb. 9: Profil mit einer Abrisskante hinten.

Aufgrund dieser Abrisskanten soll sich das Auftriebsverhalten des Flügels in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit verändern. Bei langsamer Strömung etwa gleich viel Auftrieb wie ohne Abrisskante. Bei schneller Strömung weniger Auftrieb als ein Profil ohne Abrisskante. So sollte es möglich sein durch Anbringen verschiedener Abrisskanten ein Profil zu erzeugen, welches über ein breites Strömungsgeschwindigkeitsspektrum den gleichen Auftrieb liefert, wodurch man in der Praxis dann eine mechanisch aufwendige Auftriebsregulierung über Klappen entfallen könnte.

4 Versuchsaufbau und Durchführung

4.1 Entwicklung des Versuchsaufbaus

Im Laufe der Zeit hat sich der Versuchsaufbau sowie die Messvorrichtung laufend geändert. Dies liegt daran, dass wir ein derartiges Projekt davor noch nie realisiert hatten. Nach und nach kamen die Ideen, um unseren Versuchsaufbau zu verbessern um relativ genaue Messwerte zu erhalten.

Begonnen haben wir mit einer Messvorrichtung aus Newtonmetern, die über Rollen an Gewichten hängen, um die Halterung zu tarieren. Siehe Abb. 10. An der mittleren Rolle hatten wir noch eine Stange befestigt, an der am anderen Ende der Flügel hing. Durch diese Rolle konnte sich der Flügel im Kanal nach vorne und nach hinten bewegen. Die Stangen links und rechts von der Aufhängung dienten dazu, dass wir die Höhe des Flügels ändern konnten. Ganz oben an den Stangen wurden noch zwei Rollen montiert, mit denen wir die Halterung des Flügels über Seile mit Gewichten tarieren konnten. Als wir die Halterung nach Fertigstellung das erste Mal testeten, sahen wir, dass wir durch die ganzen verwendeten Rollen soviel Reibungseffekte bekommen hatten, dass wir so gut wie nichts messen konnten. Deshalb haben wir uns schlussendlich für eine Waage und einen elektronischen Newtonmeter entschieden um die wirkenden Kräfte genauer zu messen.

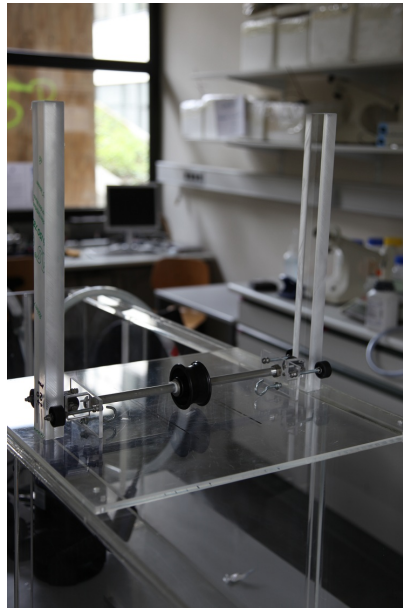


Abb. 10: Bild zum ersten Messaufbau

Eine weitere Herausforderung lag darin, eine konstante und laminare Strömung zu erzeugen. Begonnen haben wir damit das Wasser von der einen Seite des Beckens zur anderen zu pumpen um einen Wasserkreislauf und so eine Strömung im Becken zu erzeugen. Da der Druck der Pumpen das Wasser zur einen Seite hin aufstaute, entschieden wir uns zwei versetzte Lochplatten aus Plexiglas einzubauen. Dies führte allerdings nicht zum erhofften Ergebnis, da sich das Wasser hinter den Lochrasterplatten auftürmte und oben, sowie an der Seite vorbei sprudelte, womit wir keine laminare Strömung erstellen konnten. Abhilfe brachten Strohhalm mit denen wir eine halbwegs laminare Strömung erhalten haben. Für einen genaueren Versuchsaufbau siehe Abschnitt Messaufbau.

4.2 Strömungskanal

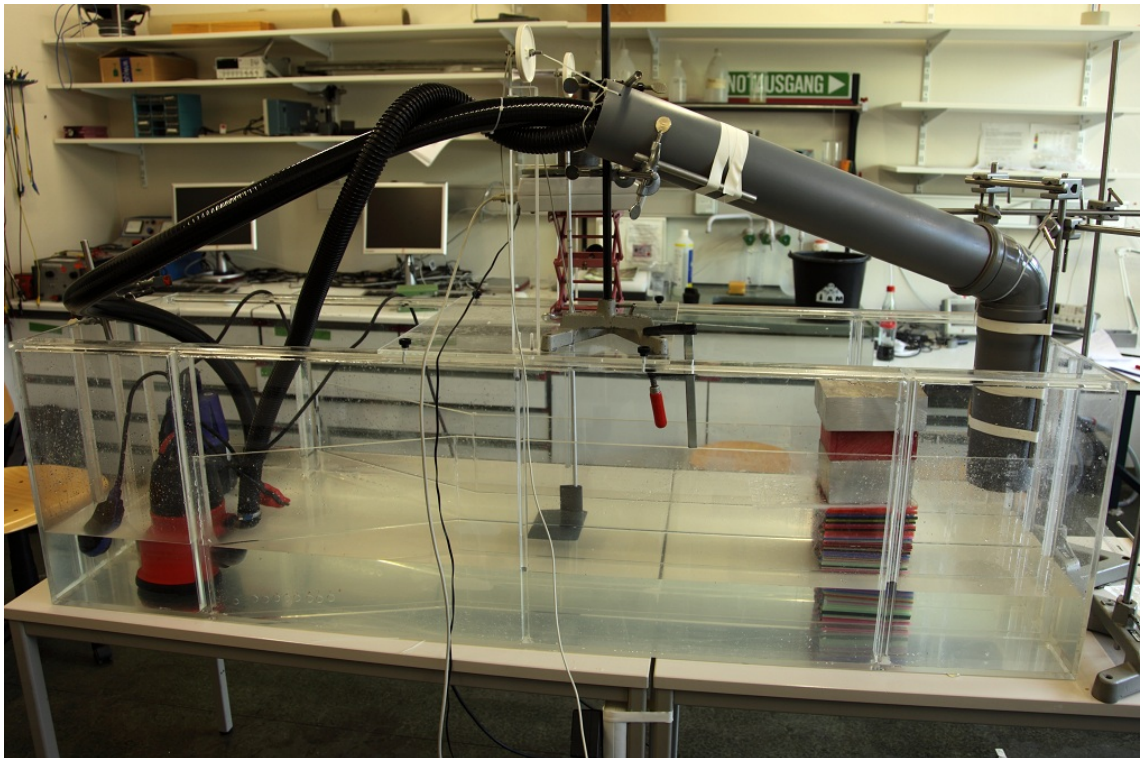


Abb. 11: Bild des Versuchsaufbaus

Wie in der Abb. 11 zu erkennen handelt es sich bei dem Strömungskanal um ein Plexiglasbecken, welches in der Mitte einen abgetrennten Kanal eingebaut hat und mit Wasser befüllt ist. Der Kanal verbreitert sich am Ende des Beckens, um so einen Aufstellplatz für die Wasserpumpen zu erzeugen. Zwei Pumpen mit Pumpleistungen um die 10000 l/h befördern dann das Wasser von dem einem Ende des Beckens zum anderen. In einer Rohrleitung werden die beiden Pumpen zusammengeführt, um so eine möglichst gleichmäßig über die Breite des Beckens verteilte Strömung zu erhalten. Hinter der Stelle an der durch das Rohr das Wasser wieder in das Becken geführt wird, befindet sich ein Stapel aus kleinen Röhrchen (Strohhalmen), durch die das Wasser strömt, bevor es den Flügel erreicht. Diese dienen dazu eine gleichmäßige laminare Strömung zu erzeugen. Oberhalb des Kanals, am oberen Rand des Beckens befestigt, befindet sich eine Plexiglasplatte auf der der Messaufbau angebracht ist. Von diesem hängt an einem Alurohr befestigt der Flügel in das Wasserbecken.

4.3 Strömungsgeschwindigkeitsmessung

Die Strömungsgeschwindigkeit wird über den Durchsatz der Pumpen bestimmt. Diesen bestimmen wir indem wir aus einer Box die mit Wasser gefüllt ist exakt $V = 30 \text{ l} = 30 \text{ dm}^3 = 0,03 \text{ m}^3$ in eine andere identische Box umpumpen. Dabei wird die dafür benötigte Zeit t gestoppt. Kennt man nun später die Querschnittsfläche A_{Kanal} des Kanals, so kann die Strömungsgeschwindigkeit $v_{\text{Strömung}}$ wie folgt berechnet werden:

$$v_{\text{Strömung}} = \frac{V}{A_{\text{Kanal}} \cdot t} \quad (11)$$

4.4 Messaufbau

Der sich im Wasser befindende Flügel ist an einer Stange befestigt, an der wir in den verschiedenen Versuchen jeweils gleichzeitig zwei Kräfte messen können, den Auf- und den Abtrieb.

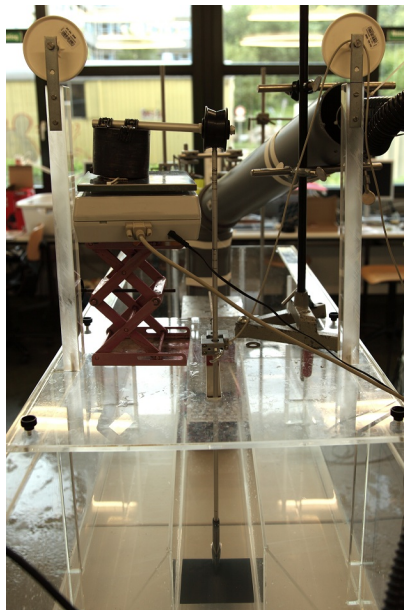


Abb. 12: Bild des Messaufbaus

4.4.1 Auftrieb

Die Auftriebskraft wirkt senkrecht zur Strömungsgeschwindigkeit, also entlang der Stange an der sich der Flügel befindet. Diese Stange ist mit einem gegenüber

dem Auftrieb sehr schweren Metallklotz beschwert. Dadurch kann auf der sich unter dem Metallklotz befindenden Waage eine Auftriebskraft gemessen werden, ohne dass sich die Höhe des Flügels merklich ändert. Die Kraft an der Waage wurde über den PC abgegriffen.

4.4.2 Abtrieb

Die Abtriebskraft wirkt parallel zur Strömungsgeschwindigkeit. Da diese Kraft nicht direkt am Flügel gemessen wird, sondern weiter oben an der Stange an der sich der Flügel befindet, wirkt hier ein Drehmoment \vec{M} . Für die am Flügel wirkende Abtriebskraft gilt dann:

$$F_{\text{Abtrieb}} = F_{\text{Gemessen}} \cdot \frac{b}{a} \quad (12)$$

wobei F_{Gemessen} die an der Stange gemessene Abtriebskraft ist und a die Länge vom Flügel zur drehbaren Aufhängung und b die Länge von der Drehbaren Aufhängung zur Stelle an der die Kraft gemessen wird.

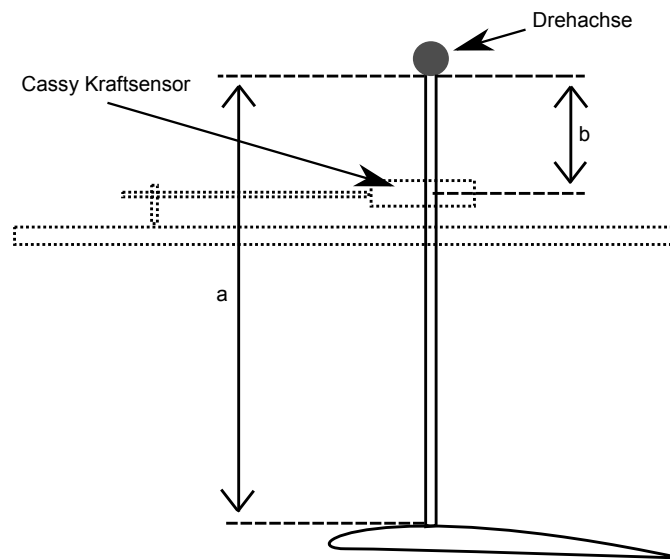


Abb. 13: Skizze zur Aufhängung der Kraftmessung

4.4.3 Elektronische Messung

Wir haben die Messdaten der Waage digital mit Hilfe des Arduinos ausgelesen. Der Arduino ist ein Mikrocontroller Board auf Basis des Amtel Atmega8. Hierzu haben wir den seriellen Ausgang der Waage mit dem seriellen Eingang des Arduinos verbunden. Über eine kleines selbstgeschriebenes Programm konnten wir nun auf Knopfdruck eine von uns bestimmte Anzahl (meist 200) Messwerte aufnehmen. Dies hatte den Vorteil, dass wir so über eine Mittelung der Messwerte die stark schwankenden Werte der Waage besser ausgleichen konnten.

4.5 Flügelprofil

Das verwendete Flügelprofil ist ein Profil, welches aus einer Datenbank für getestete Profile entnommen wurde. Genauer über die Flügel mit Abrisskanten ist im Grundlagenteil zu lesen.



Abb. 14: Profil ohne Abrisskante

4.5.1 Aufhängung der Flügelprofile

Die Flügel wurden alle mittig an einer Stange befestigt, die von einem symmetrischen flügelartigem Profil umgeben war. Dies diente dazu die Widerstandskraft der Stange möglichst gering zu halten.

Für die mittige Befestigung haben wir uns entschieden, da diese Variante am einfachsten zu realisieren war. Andere Ideen waren, den Flügel an den Seiten mit zwei Stangen zu befestigen oder eine Stange hinten an den Flügel zu befestigen, um die Verwirbelungen auf dem Flügel zu minimieren. Erstere Idee wurde aufgrund der vermutlich starken Randeffekte verworfen, die zweite Idee wäre aufgrund des dünnen Endes des Flügels schwer realisierbar gewesen.

5 Ergebnisse

5.1 Erstellen einer laminaren Strömung

Es ist uns gelungen, eine an einem Ort zeitlich konstante Strömungsgeschwindigkeit, also eine stationäre Strömung, herzustellen. Außerdem konnten wir abschnittsweise, unter anderem in der Höhe des Flügels, eine annähernd laminare Strömung erstellen. Beschränkt ist dies u.a. durch die Dicke der Strohhalme, da diese vor allem die großen über die die Wasserhöhe gehenden, Wirbel verhindern, aber Wirbel in der Größenordnung der Durchmesser der Strohhalme nicht.

Um zu bestätigen, dass die Strömungsgeschwindigkeit über die ganze Kanalhöhe und Breite erhalten bleibt und somit eine gleich verteilte, laminare Strömung vorliegt, hängen wir einen Holzklötz in die Strömung, regulieren dessen Höhe und messen seine Abtriebskraft. Da bei der Messung der Abtriebskraft ein Dreh-

moment $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$ wirkt, ist hier ein Zusammenhang $F \propto 1/r$ zu erwarten, wenn das Drehmoment konstant bleibt und somit die Strömungsgeschwindigkeit über die Höhe verteilt gleich ist.

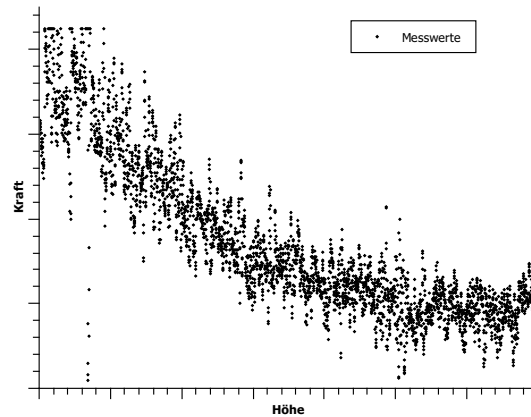


Abb. 15: $1/r$ -Zusammenhang des Drehmomentes auf die Flügelaufhängung.

In Abb. 15 ist zu erkennen, dass eine $1/r$ -Zusammenhang vorliegt. Die Theorie konnte somit bestätigt werden. Das Diagramm wurde mit Hilfe von QTIPLLOT erstellt.

Trotz vorliegen einer halbwegs gleichmäßig verteilten Strömung, kann aber davon ausgegangen werden, dass es zu vielen Randeffekten kommt, welche die Messungen verfälschen, da der Kanal sehr schmal gebaut wurde um die Strömungsgeschwindigkeit zu erhöhen.

5.2 Messungen der Flügelprofile

In diesem Experiment wurden vier Flügelprofile untersucht, die alle die gleiche Grundform haben. Wir haben zwei Profile ohne Abrisskanten untersucht, welche die selbe Breite haben. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrer Länge. Der eine Flügel ist ca. 10 cm lang der andere 20 cm. Weiterhin wurden zwei Flügel mit 20 cm Länge und mit Abrisskanten an zwei verschiedenen Stellen untersucht. Alle vier Flügel wurden auf Auf- und Abtrieb hin untersucht.

Alle folgenden Diagramme dieses Abschnittes wurden mit QTIPLLOT erstellt.

5.2.1 Auftrieb kleiner Flügel ohne Kante

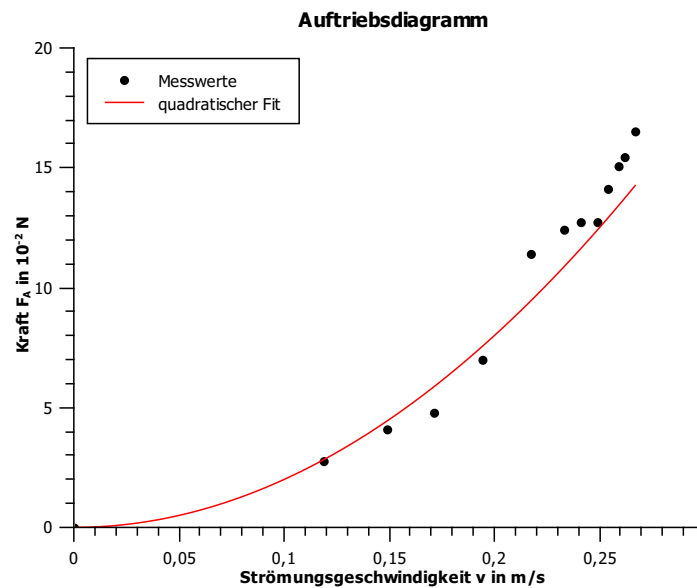


Abb. 16: Auftriebsmessung des kleinen Flügels

In Abb. 16 ist zu die Auftriebskraft gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen. Der Fit zeigt einen quadratischen Zusammenhang. Dies stimmt mit der Theorie weitgehend überein. Bei großen Strömungsgeschwindigkeiten scheint der Auftrieb stärker anzusteigen, was uns zeigt, dass die Profilform sehr gute Auftriebseigenschaften aufweist. Fehler sind durch Oberflächen und Randeﬀekte sowie geringe Verwirbelungen in der Strömung zu erklären.

5.2.2 Abtrieb kleiner Flügel ohne Kante

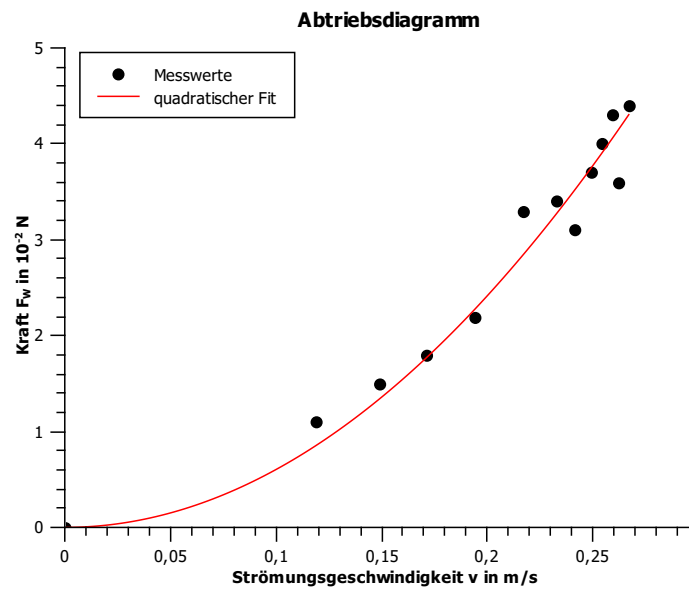


Abb. 17: Abtriebsmessung des kleinen Flügels

In Abb. 17 ist zu sehen, dass die Widerstandskraft F_W proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit v ist. Der Fit stimmt mit den Theoriewerten relativ gut überein. Bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten schwanken die Messwerte mehr, da die Randeﬀekte zunehmen und die Strömung ihren laminaren Charakter verliert.

5.2.3 Auftrieb großer Flügel ohne Kante

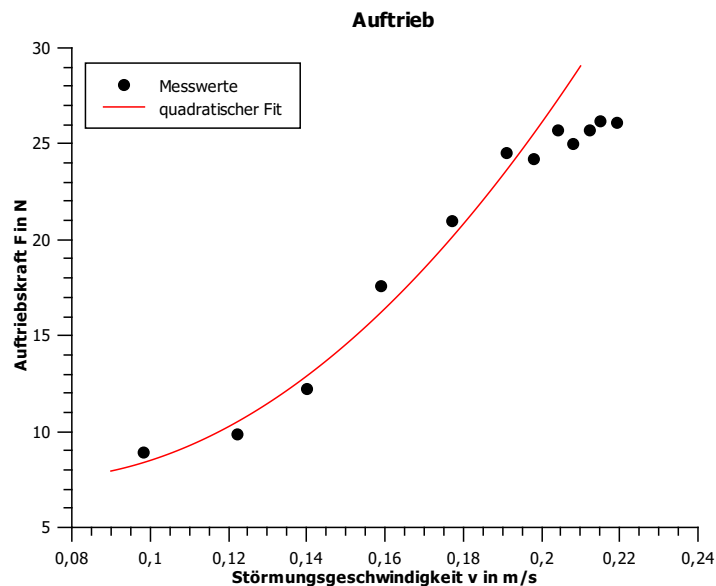


Abb. 18: Auftriebsmessung des großen Flügels ohne Abrisskante

In Abb. 18 ist die Auftriebskraft des großen Flügels gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen. Es ist zu sehen, dass bei kleineren Geschwindigkeiten ein quadratischer Zusammenhang vorliegt. Zwei Dinge fallen bei diesem Diagramm auf. Zum Einen wird die Steigung für große Strömungsgeschwindigkeiten geringer und zum Anderen scheint der quadratisch erwartete Zusammenhang seinen y-Achsenabschnitt nicht im Nullpunkt zu haben.

Wir gehen davon aus, dass bei größeren Strömungen die Randeffekte und die Verwirbelungen in der Strömung zunehmen und deshalb die Auftriebseigenschaften dadurch gemindert werden. Damit ist zu erklären, dass die Auftriebskraft für große Strömungsgeschwindigkeiten nicht mehr mit einem theoretisch erwarteten quadratischen Verlauf übereinstimmt.

Da der erwartete Verlauf zwar mit den Werten der geringeren Strömungsgeschwindigkeit übereinstimmt, jedoch der quadratische Fit seinen y-Achsenabschnitt nicht bei Null hat, gehen wir davon aus, dass dies eine fehlerhafte Nulleichung zurückzuführen ist. Besonders deutlich wird dies, wenn man dieses Diagramm und die an gleichen Versuchstag aufgenommenen Diagramme der Flügel mit Abrisskanten vergleicht. Auch bei diesen Messungen scheint der y-Achsenabschnitt verschoben.

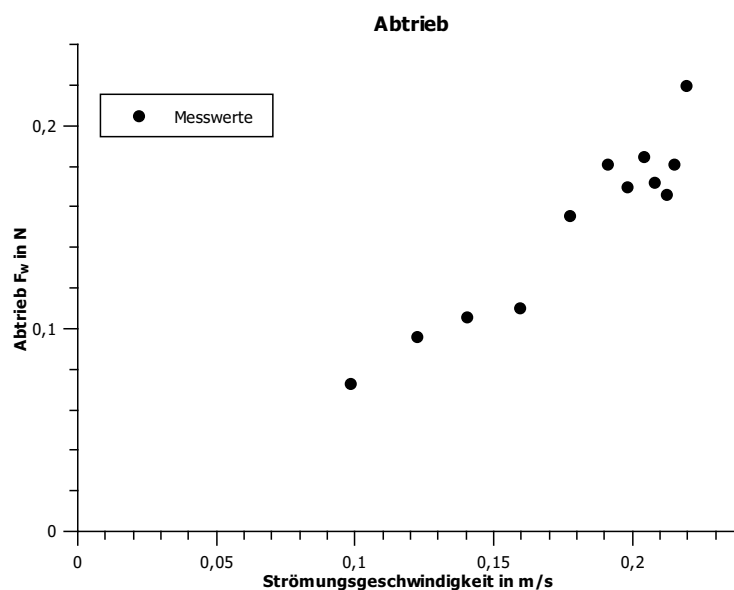


Abb. 19: Abtriebsmessung des großen Flügels ohne Abrisskante

5.2.4 Abtrieb großer Flügel ohne Kante

In Abb. 19 ist die Abtriebskraft gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen. Wir erkennen hier, dass der Abtrieb mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit ebenfalls zunimmt. Es kommt jedoch zu starken Schwankungen der Werte. Dies ist wieder auf die starken Rand- und Oberflächeneffekte im engen Strömungskanal zurückzuführen. Theoretisch hätte man einen quadratischen Zusammenhang wie bei dem kleinen Flügel erwartet. Es ist jedoch aufgrund der starken Schwankungen schwer zu sagen, um welchen Zusammenhang es sich handelt. Dieser scheint eher linear zu sein. Für größere Werte werden die Schwankungen extremer. Dies ist dadurch zu begründen, dass bei größeren Geschwindigkeiten die Oberflächenwellen und die Verwirbelungen zugenommen haben.

5.2.5 Vergleich großer und kleiner Flügel

Als erstes wollen wir den Auf- und Abtrieb des großen und des kleinen Flügels vergleichen.

In beiden Abbildungen konnte ein quadratischer Verlauf des Auftriebs mit der Strömungsgeschwindigkeit gezeigt werden, was mit der Theorie übereinstimmt. Weiterhin kann man festhalten, dass die Auftriebswerte des größeren Flügels grö-

ßer sind, als die des kleineren. Auch dies war zu erwarten, da $F_A \propto A$ gilt. Wobei A die Oberfläche des Flügels ist.

Bei beiden Flügeln ist zu beobachten, dass für große Geschwindigkeiten die Auftriebswerte stärker von der Theorie abweichen. Beim großen Flügel sind mehr Randeffekte zu erwarten, was sich auch in einem stärkeren Absinken der Steigung bemerkbar macht.

Vergleicht man die beiden Flügel in ihrem Abtrieb, so fällt auf, dass der Abtrieb des größeren Flügels größere Werte aufweist. Dies bestätigt die Theorie, dass der Abtrieb mit der Querschnittsfläche des Flügels zusammenhängt.

Bei dem größeren Flügel kann die Theoriekurve nicht nachgewiesen werden, da die Schwankungen der Werte zu groß werden. Dies ist mit den extremen Randeffekten im engen Kanal zu erklären.

Insgesamt kann man sagen, dass sich am Verlauf der Werte erkennen lässt, dass beide Flügel die gleiche Querschnittsform besitzen und somit ähnliche Eigenschaften aufweisen. Abweichungen sind, wie schon oben erwähnt, vor allem durch die von der Größe des Flügels abhängigen Randeffekte zu erklären.

5.2.6 Auftrieb mit einer Abrisskante in der Mitte

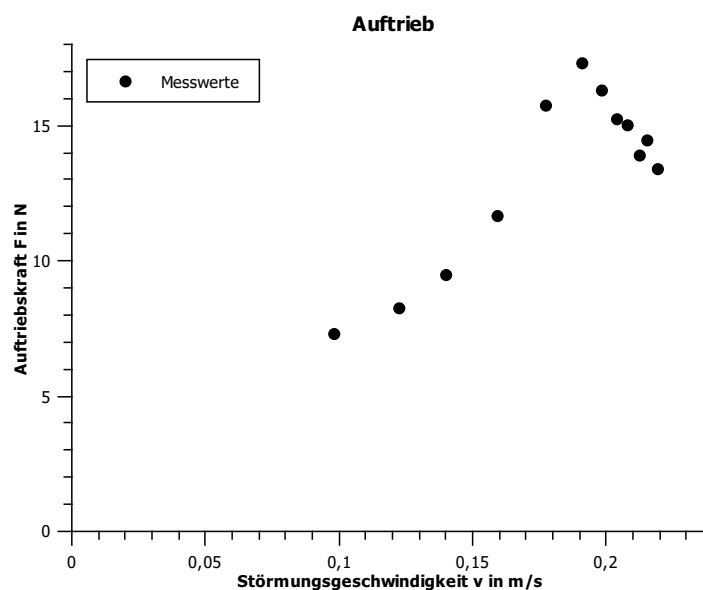


Abb. 20: Auftriebsmessung des großen Flügels mit einer Abrisskante in der Mitte.

In Abb. 20 ist die Auftriebskraft des Flügels mit einer Abrisskante in der Mitte im Flügel gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen. Ein solcher Flügel ist in Abb. 8 dargestellt.

Für Geschwindigkeiten unter $v = 0,19$ m/s ist ein quadratischer Verlauf zu erkennen, welcher seinen y-Achsenabschnitt nicht im Ursprung hat. Oberhalb dieser Geschwindigkeit sinken die Auftriebswerte mit steigender Geschwindigkeit linear ab. Durch die Abrisskante scheint sich also die Auftriebseigenschaft des Flügels verändert zu haben.

Unter $0,19$ m/s stimmt der Auftrieb also annähernd mit dem Auftrieb des Flügels ohne Abrisskante (Siehe Abb. 18) überein. Der Auftrieb folgt dem quadratisch erwarteten Verlauf der Theorie. Wie schon erwähnt liegt der y-Achsenabschnitt nicht bei Null, was als Fehler bei der Nulleichung interpretiert wird, da dies bei allen an diesem Versuchstag aufgenommenen Messungen auftritt.

Oberhalb von $0,19$ m/s weisen die beiden Flügel unterschiedliche Eigenschaften auf. Der Flügel ohne Abrisskante weist ein geringes Absinken der Steigung auf, aber der Auftrieb nimmt mit steigender Strömungsgeschwindigkeit weiter zu. Bei dem Flügel mit der Abrisskante nehmen die Auftriebswerte bei steigender Strömungsgeschwindigkeit ab. Durch die Abrisskante scheint es also ab einer

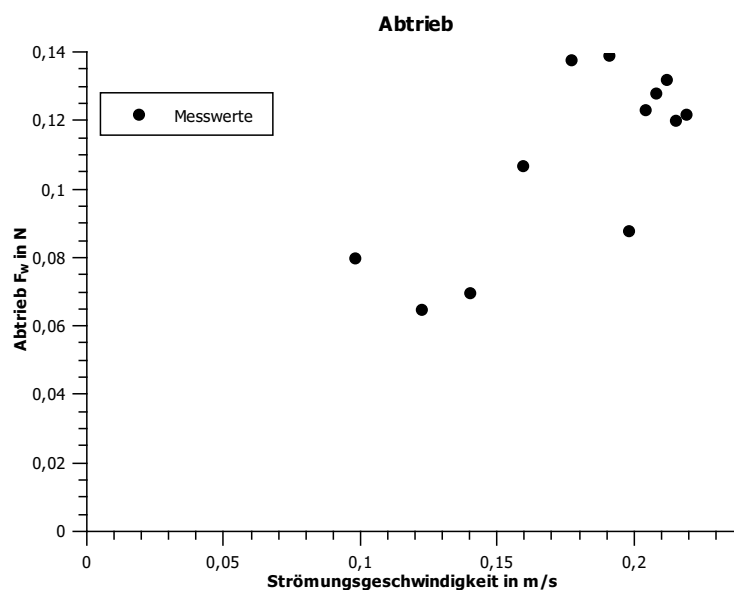


Abb. 21: Abtriebsmessung des großen Flügels mit einer Abrisskante in der Mitte.

bestimmten Geschwindigkeit zu Wirbeln zu kommen, welche die Auftriebseigenschaften des Flügels mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit vermindern.

5.2.7 Abtrieb mit einer Abrisskante in der Mitte

In Abb. 21 ist die Abtriebskraft des Flügels mit der Abrisskante im mittigen Bereich gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen. Man erkennt hier ein zunehmen der Abtriebskraft mit steigender Strömungsgeschwindigkeit, wobei die Werte sehr stark schwanken. Wie auch schon bei dem Flügel ohne Abrisskante sind diese Schwankungen auf Randeffekte und Verwirbelungen zurückzuführen. Die Werte liegen in einem ähnlichen Bereich wie bei dem Flügel ohne Abrisskante, schwanken aber noch stärker als bei diesem, was eventuell auf die Abrisskante und die daran entstehenden Ströme zurückzuführen ist. Die Theorie wird mit diesen Werten nicht direkt bestätigt, aber aufgrund des Vergleichs mit dem Flügel ohne Abrisskante scheinen die Werte doch in einem sinnvollen Bereich zu liegen.

5.2.8 Auftrieb mit einer Abrisskante hinten

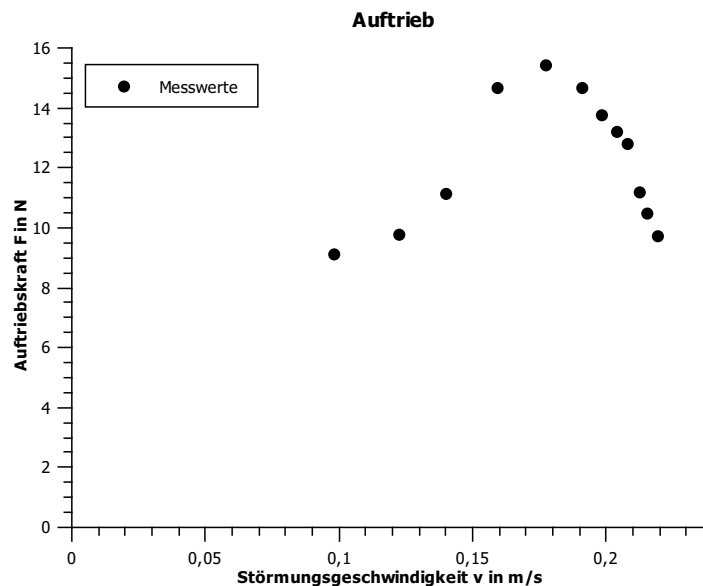


Abb. 22: Auftriebsmessung des großen Flügels mit einer Abrisskante hinten.

In Abb. 22 ist die Auftriebskraft des Flügels mit einer Abrisskante hinten im Flügel gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen. Ein solcher Flügel ist in Abb. 9 dargestellt.

Auch hier ist unter einer Geschwindigkeit von $v = 0,18$ m/s ein annähernd quadratischer Verlauf zu erkennen mit einem y-Achsenabschnitt der im gleichen Bereich liegt, wie bei dem Flügel ohne Abrisskante und mit mittlerer Abrisskante. Wir gehen also von den selben Gründen dafür aus. Der quadratische Verlauf entspricht wieder der zugrunde liegenden Theorie des Auftriebs für Flügel ohne Abrisskanten.

Oberhalb der genannten Geschwindigkeit scheint der Auftrieb wieder linear oder gar quadratisch abzufallen. Wir beobachten also auch hier ein Absinken des Auftriebs bei erhöhter Geschwindigkeit, was auf die angebrachte Abrisskante zurückzuführen ist. Wie bei dem Flügel mit der Abrisskante in der Mitte scheint es ab einer bestimmten Geschwindigkeit zu Wirbeln zu kommen, die den Auftrieb des Flügels je nach Stärke immer mehr abschwächen.

5.2.9 Abtrieb mit einer Abrisskante hinten

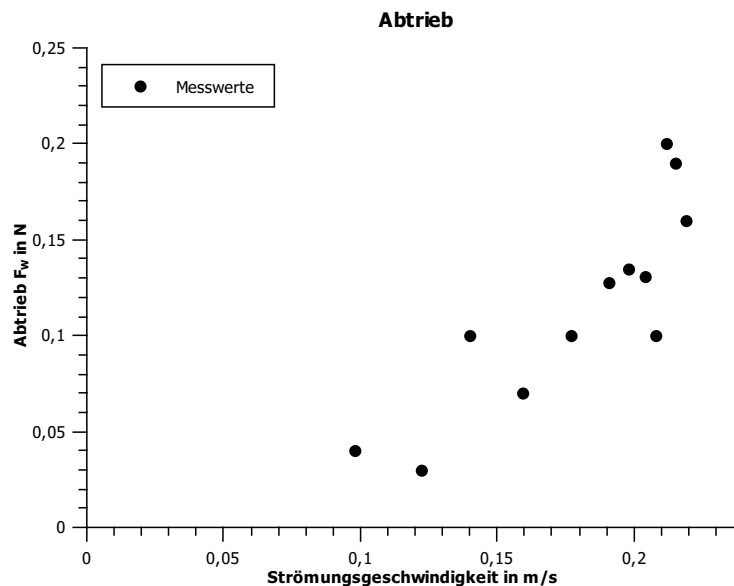


Abb. 23: Abtriebsmessung des großen Flügels mit einer Abrisskante hinten.

In Abb. 23 ist die Abtriebskraft des Flügels mit einer Abrisskante hinten im Flügel gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen.

Man erkennt hier, wie auch schon bei dem Flügel ohne Abrisskante und mit der Abrisskante in der Mitte ein zunehmen des Abtriebs mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit. Wie bei dem anderen Flügel mit Abrisskante schwanken die Messwerte auch hier stark, liegen aber in einem ähnlichen Bereich. Weiterhin scheint der Verlauf eher linear zu sein, was mit dem Verlauf des großen Flügels ohne Abrisskante übereinstimmt. Die starken Schwankungen sind erneut auf die Randeffekte des schmalen Strömungskanals und auf die Verwirbelungen durch die Abrisskanten zurückzuführen.

5.2.10 Vergleich Flügel mit und ohne Abrisskanten

Wir wollen nun noch den Abtrieb und den Auftrieb des Flügels mit und ohne Abrisskante vergleichen. Bei dem Auftrieb fällt auf, dass ab einer bestimmten Geschwindigkeit die Auftriebswerte wieder abnehmen, wenn der Flügel eine Abrisskante besitzt. Ab einer Geschwindigkeit die für beide Flügel mit Abrisskanten fast identisch ist, nimmt der Auftrieb also ab. Diese Geschwindigkeit scheint also für diese Flügelform in etwa charakteristisch zu sein und nicht von der genauen Position der Abrisskante abzuhängen. Wie die Stärke des Abfallens der Steigung

von der Position der Abrisskante abhängt müsste jedoch noch weiter untersucht werden. Dies übersteigt aber leider den Umfang dieses Projektes.

Für die Abtriebseigenschaften scheint eher die Grundprofilform relevant zu sein, als die Abrisskanten oder deren Position. Bei den Flügeln mit und ohne Abrisskante nimmt der Abtrieb mit der Geschwindigkeit zu, was zu erwarten war. Jedoch schwanken die Werte der Flügel mit den Abrisskanten stärker als die Werte des Flügels ohne Abrisskante. Da beim Auftrieb jedoch ein Einfluss der Abrisskanten erst ab einer bestimmten Geschwindigkeit nachgewiesen werden konnte, ist davon auszugehen, dass diese Schwankungen durch die Messung zustande kamen und nicht auf die Abrisskanten zurückführbar sind. Der Abtrieb scheint also mehr von der Grundform aus der Frontalansicht abzuhängen also von der Form der Oberfläche, solange diese eine ähnliche Größe aufweist.

5.3 Fehler

In diesem Abschnitt wollen wir noch einmal die wichtigsten allgemeinen und speziell auftretenden Fehler beschreiben, die die Messungen beeinflusst haben können.

Da der Kanal relativ eng ist (ca. 12cm) kommt es wie im Grundlagenteil beschrieben rechts und links an den Wänden zur Reibung und die Strömungsgeschwindigkeit ist nicht überall konstant gleich. Auch am Boden kann es zudem zu Reibungseffekten kommen, so dass auch für verschiedene Höhen verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten existieren. Die Flügel wurden aus diesem Grund alle mittig montiert, um so mögliche großen Abstand von den Rändern zu haben und Randeffekte zu minimieren.

Weiterhin durften sich die Flügel auch nicht zu nahe unter der Wasseroberfläche befinden, da es dann passieren kann, dass der Flügel die Wasseroberfläche ansaugt, um die auf ihn wirkende Auftriebskraft zu minimieren. Zu sehen ist dies in Abb. 24.

Außerdem konnten Wellen an der Oberfläche nicht vollkommen verhindert werden, da das Wasser durch ein großes Rohr eingeströmt ist, musste die Strömung erst noch in die Form des Kanals gebracht werden. Dies geschah hauptsächlich durch die sich im Kanal befindenden Strohhalme. Die Strömung wurde so optimiert, konnte jedoch nicht vollkommen kontrolliert werden, was unter anderem an den Wellen an der Oberfläche zu sehen ist.

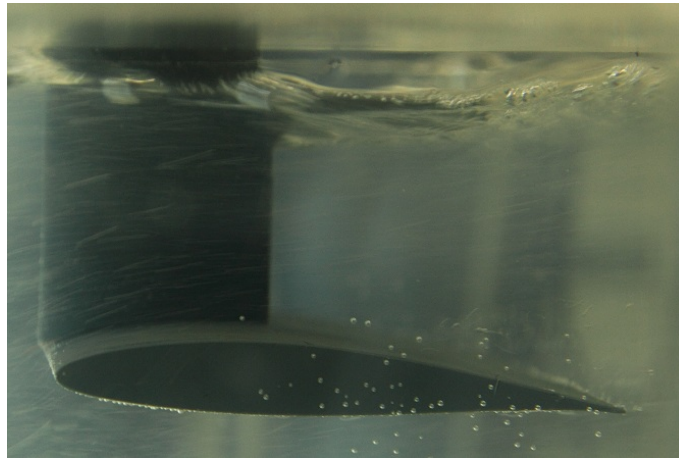


Abb. 24: Durch den Flügel wird die Wasseroberfläche angesaugt.

6 Verbesserungsmöglichkeiten

Wenn wir mehr Zeit für diesen Versuch hätten, würden wir am Versuchsaufbau noch einiges ändern um eine noch bessere laminare Strömung, und somit genauere Messergebnisse zu erhalten. Zum einem würden wir das Wasser unterhalb der Wasserhöhe entlang pumpen um somit Lufteinschluss und Leistungsverlust zu vermeiden. Des weiterem müsste man den Strömungskanal breiter machen um die Randeffekte zu minimieren. Dazu wäre allerdings mehr Pumpleitung erforderlich um den Verlust der Strömungsgeschwindigkeit auszugleichen.

7 Fazit

Unser Ziel war es zu untersuchen, ob die Auftriebseigenschaften eines Flügels allein durch die Form so weit verändert werden können, dass auftretende Probleme bei Hydrofoils, durch die Form des Flügels beseitigt werden könnten. Wir haben festgestellt, dass durch Anbringen bestimmter Abrisskanten der Auftrieb eines Flügels mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit wieder abnimmt. Dies könnte das Problem, dass man mit meinem Hydrofoil leicht bei Böen aus dem Wasser abheben und dann darauf aufschlagen kann, beseitigen. Man kann also sagen, dass dieses Projekt durchaus sinnvolle Ergebnisse geliefert hat. Um diese Ergebnisse anzuwenden, müsste noch die Abhängigkeit der Position des der Abrisskanten genauer untersucht werden. Dies würde leider den Rahmen dieses Praktikums sprengen.

Insgesamt haben wir jedoch mit unserem Projekt Theorie und Versuch vereinen können und interessante Ergebnisse erhalten. Weiterhin konnten wir in diesem Projekt lernen, sich selbstständig eine Aufgabenstellung zu geben und diese zu bearbeiten, um so Stück für Stück unserem Ziel näher zu kommen.

Abbildungsverzeichnis

1	Bild eines Hydrofoils (4)	3
2	Bilder einer laminaren Strömung von links nach rechts mit Hindernissen. (1)	5
3	Flüssigkeitsvolumenelement. (1)	6
4	parabelförmige laminare Strömung. (1)	7
5	Entstehung des dynamischen Auftriebs a) ohne Zirkulation b) nur Zirkulation c) Überlagerung (u ist hier die Strömungsgeschwindigkeit). (1)	8
6	Skizze zum Auftrieb eines Flügels. (1)	9
7	Widerstandsbeiwerte verschiedener Profile. (1)	10
8	Profil mit einer Abrisskante in der Mitte.	11
9	Profil mit einer Abrisskante hinten.	11
10	Bild zum ersten Messaufbau	13
11	Bild des Versuchsaufbaus	14
12	Bild des Messaufbaus	15
13	Skizze zur Aufhängung der Kraftmessung	17
14	Profil ohne Abrisskante	18
15	$1/r$ -Zusammenhang des Drehmomentes auf die Flügelaufhängung.	20
16	Auftriebsmessung des kleinen Flügels	21
17	Abtriebsmessung des kleinen Flügels	22
18	Auftriebsmessung des großen Flügels ohne Abrisskante	23
19	Abtriebsmessung des großen Flügels ohne Abrisskante	24
20	Auftriebsmessung des großen Flügels mit einer Abrisskante in der Mitte.	26
21	Abtriebsmessung des großen Flügels mit einer Abrisskante in der Mitte.	27
22	Auftriebsmessung des großen Flügels mit einer Abrisskante hinten.	28
23	Abtriebsmessung des großen Flügels mit einer Abrisskante hinten.	29
24	Durch den Flügel wird die Wasseroberfläche angesaugt.	31

Literaturverzeichnis

- [1] DEMTRÖDER, Wolfgang *Experimentalphysik 1, Mechanik und Wärmelehre*, 5.Auflage
- [2] THE INTERNATIONAL HYDROFOIL SOCIETY
http: //www.foils.org
- [3] THE AIRFOIL INVESTIGATION DATABASE
http: //www.worldofkrauss.com
- [4] UK INTERNATIONAL MOTH CLASS ASSOCIATION
http: //www.internationalmoth.co.uk
- [5] TEKNOLOGIKA - MOTH BLOG
http: //www.teknologika.com/mothblog/the-evolution-of-moth-main-hydrofoils
- [6] A GOOD MIX OF CREATIVITY
http: //drlojz.blogspot.com
- [7] BOAT DESIGN NET
http: //www.boatdesign.net