



# Projektpraktikum 2011 - Hydrofoils

## eine Studie zur Hydrodynamik

Moritz Futscher, Lukas Schertel, Lukas Ebner



### 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. 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?



### 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.

### Theorie

#### 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.

#### Abtrieb

Der Abtrieb ist die Widerstandskraft, des umströmten Körpers. Diese ergibt sich aus Addition der Reibungskraft des Körpers mit der ihn umströmenden laminaren Strömung und der Druckwiderstandskraft, die aus der Druckdifferenz zwischen dem Strömungsgebiet vor und hinter dem Körper entsteht. Die Widerstandskraft  $F_W$  hängt ab von der Querschnittsfläche  $A$  des umströmten Körpers und von der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , wobei gilt:  $F_W \propto v^2$ . Über Staudruck  $p_s$  erhält man für den Abtrieb:

$$F_W = c_W \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A$$

$c_W$  stellt hier den Widerstandsbeiwert dar, der vom Profil des umströmten Körpers abhängt.  $\rho$  ist die Dichte der umströmenden Flüssigkeit.

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

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_0$$

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

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

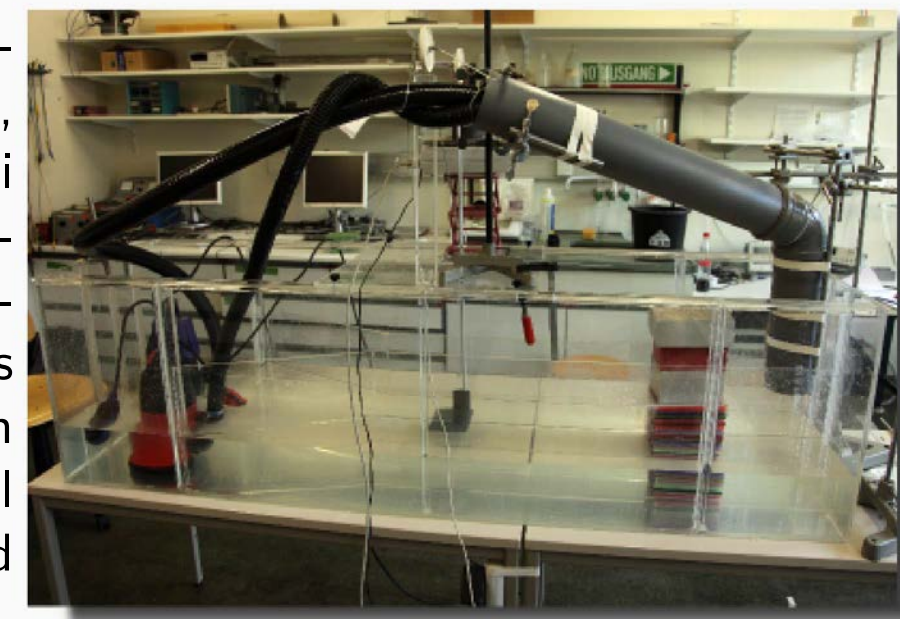
$c_A$  stellt hier den Auftriebsbeiwert dar, der von der Form des Profils abhängt.  $A$  ist die Gesamtfläche des Flügels.

### Aufbau

#### Strömungskanal

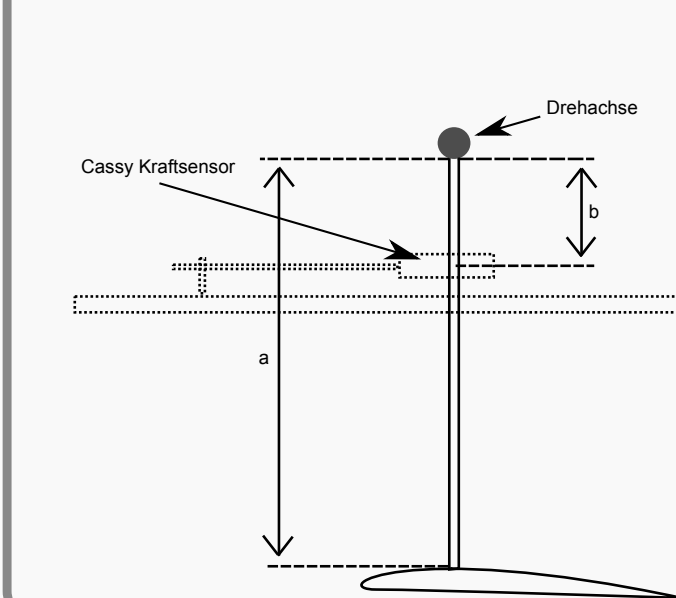
Wie in der Abbildung zu erkennen, handelt es sich bei dem Strömungskanal um ein Plexiglasbecken, welches in der Mitte einen abgetrennten Kanal eingebaut hat und mit Wasser befüllt ist. Der Kanal verbreitert sich am Ende des Beckens, um so einen Aufstellplatz für die Wasserpumpen zu erzeugen. Zwei Pumpen 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 Röhren (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. 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  $A_{\text{Kanal}}$  des Kanals, so kann die Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\text{Strömung}}$  wie folgt berechnet werden:

$$v_{\text{Strömung}} = \frac{V}{A_{\text{Kanal}} \cdot t}$$



### 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.

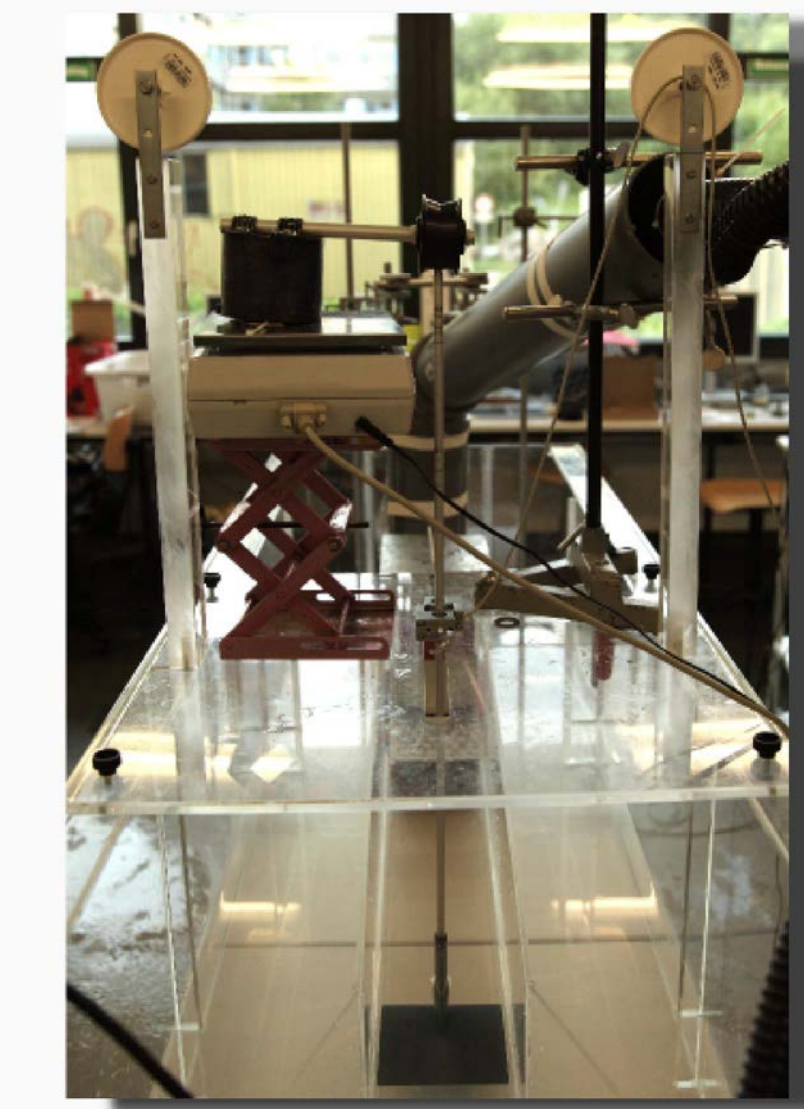


### Abtriebskraft

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:

$$F_{\text{Abtrieb}} = F_{\text{Gemessen}} \cdot \frac{b}{a}$$

wobei  $F_{\text{Gemessen}}$  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.



### Auftriebskraft

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.

### Ergebnisse

#### Laminare 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.

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 Holzklötzchen in die Strömung, regulieren dessen Höhe und messen seine Abtriebskraft. Da bei der Messung der Abtriebskraft ein Drehmoment  $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$  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.

In Abbildung 1 ist zu erkennen, dass ein  $1/r$ -Zusammenhang vorliegt. Die Theorie konnte somit bestätigt werden.

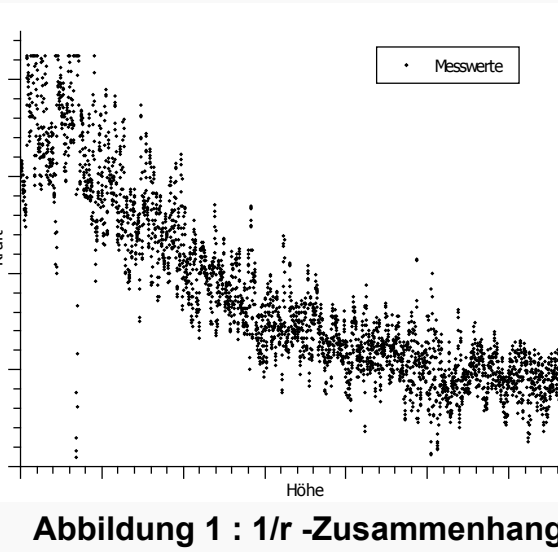


Abbildung 1: 1/r-Zusammenhang

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

#### Auftrieb

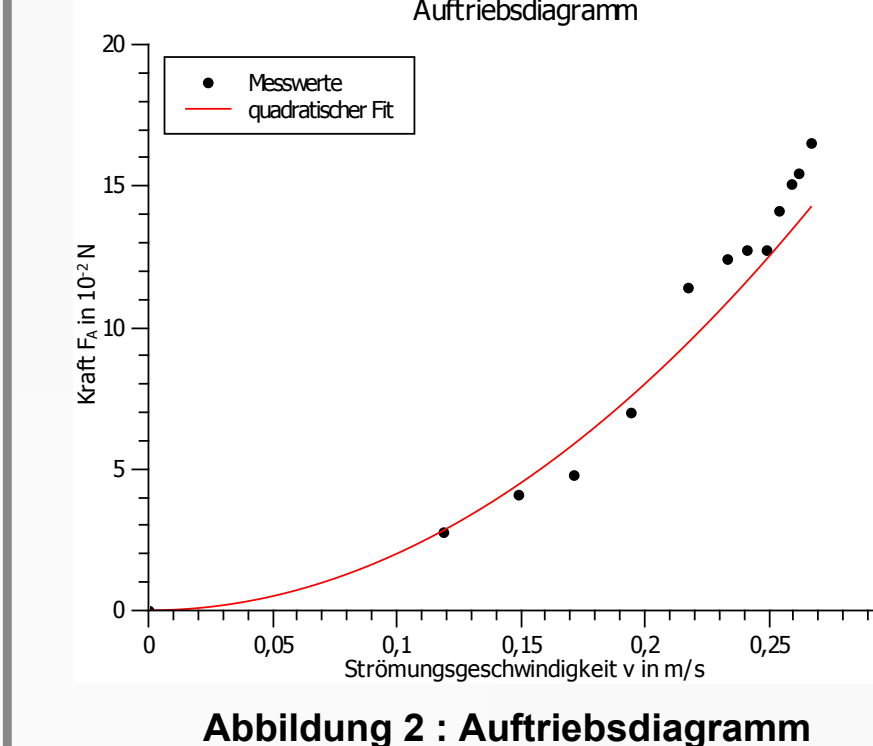
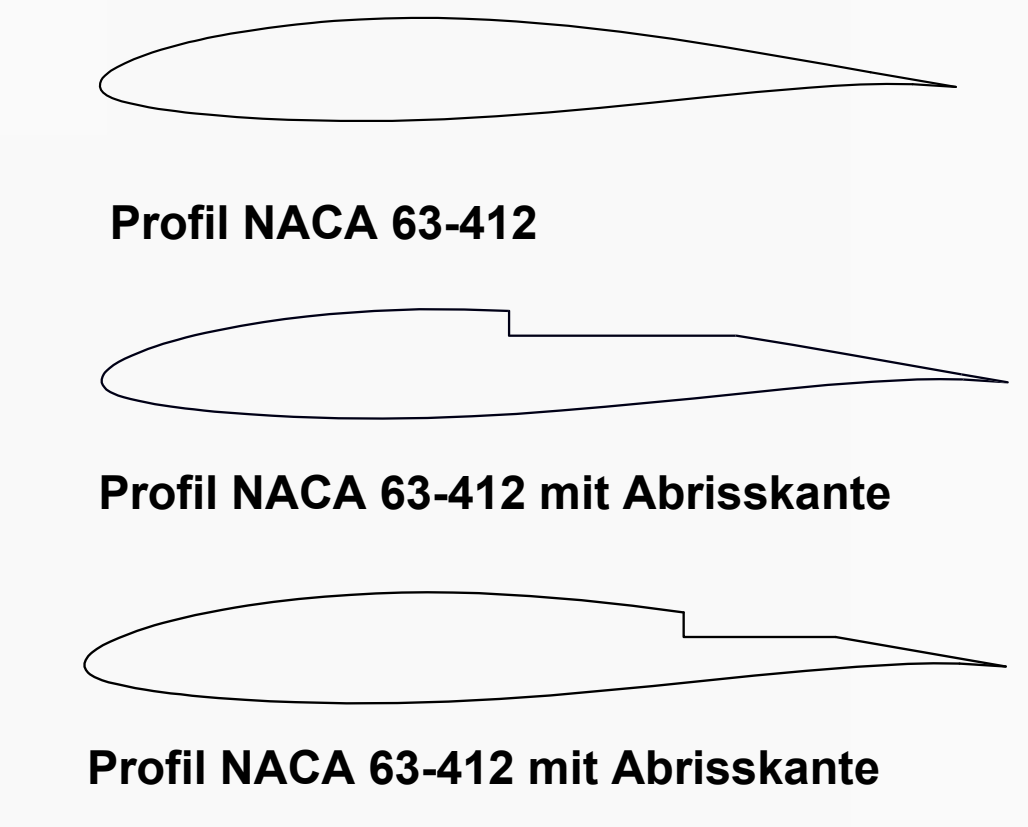


Abbildung 2: Auftriebsdiagramm

In Abbildung 2 ist die Auftriebskraft gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen. Der Fit zeigt einen quadratischen Zusammenhang. Dies stimmt mit der Theorie

### Flügelprofil

Das verwendete Flügelprofil ist ein Profil, welches aus einer Datenbank für Tragflächenprofile entnommen wurde. Des weiteren wurden folgende Profilformen mit und ohne Abrisskanten in der Werkstatt in Auftrag gegeben. Da diese zum Zeitpunkt des Erstellens des Plakates jedoch nicht fertig waren, konnten diese noch nicht untersucht werden. Wir erwarten veränderte Auf- und Abtriebseigenschaften dieser Profile. Bei Interesse der Ergebnisse dieser Flügel, verweisen wir auf den Bericht.



Profil NACA 63-412

Profil NACA 63-412 mit Abrisskante

Profil NACA 63-412 mit Abrisskante

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 Randeffecte sowie geringe Verwirbelungen in der Strömung zu erklären.

#### Abtrieb

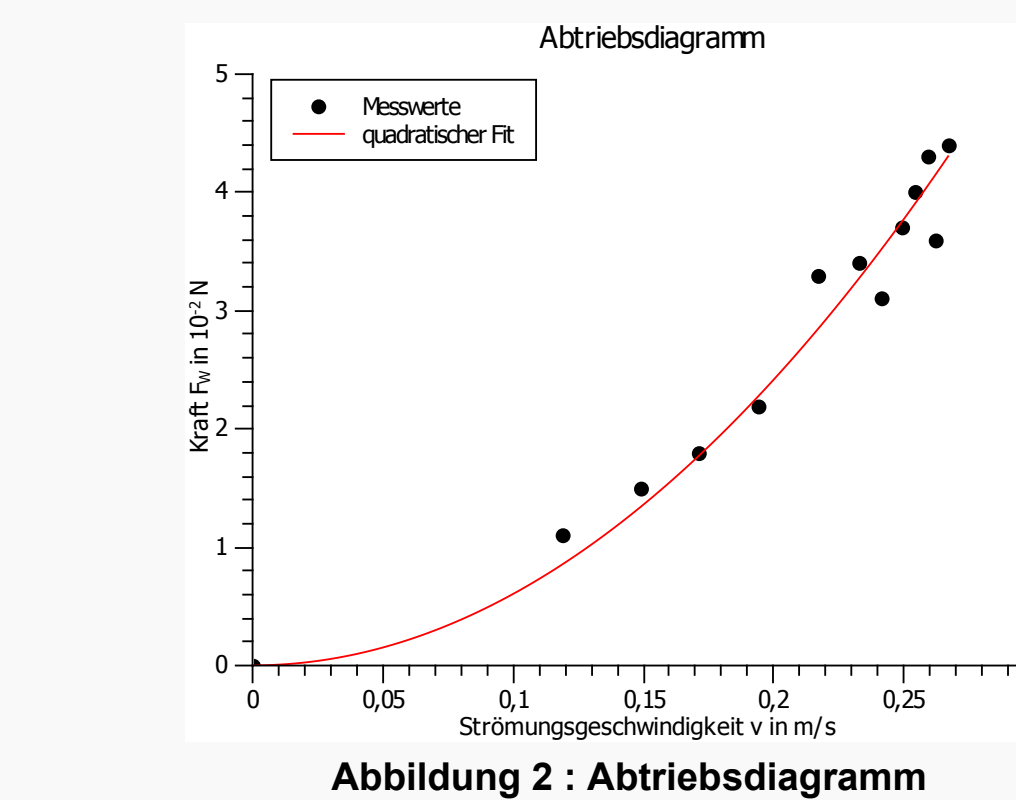
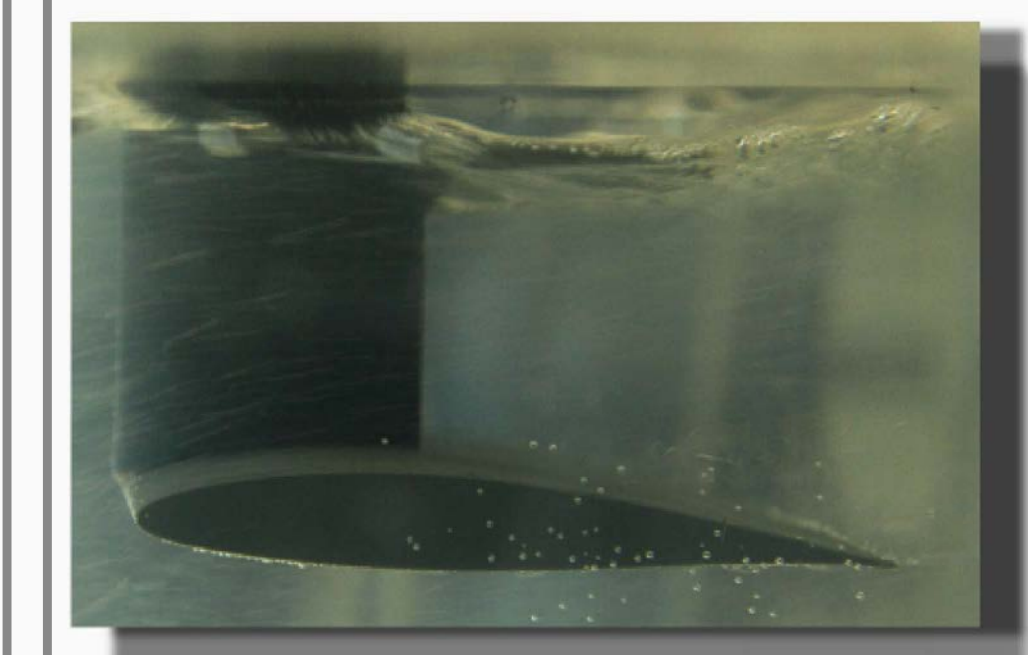


Abbildung 2: Abtriebsdiagramm

In der Abbildung 3 ist zu sehen, dass die Widerstandskraft  $F_W$  proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit  $v^2$  ist. Der Fit stimmt mit dem theoretisch erwarteten Verlauf relativ gut überein. Bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten schwanken die Messwerte mehr, da die Randeffecte zunehmen und die Strömung ihren laminaren Charakter verliert.

### Fehlerquellen

- keine perfekte laminare Strömung
- Oberflächenwellen
- Reflexion und Reibung der Strömung am Boden und an Wänden (Randeffecte)
- Flügel saugt Wasseroberfläche an



### Verbesserungsmöglichkeiten

- Wasser unterhalb der Wasserhöhe entlangspülen um Luftabschluss und Leistungsverlust zu vermeiden
- breiteres Becken um weniger Randeffecte zu erhalten (dadurch jedoch Verlust an Strömungsgeschwindigkeit)

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 Lorenz, für zahlreiche clevere Ideen. Des weiteren wollen wir der Werkstatt danken, die uns den Aufbau des Kanals und die Herstellung der Flügel vereinfacht hat.