



~~X~~/WS 20.11../12..

Praktikum: (P1/~~X~~) (~~X~~o/Di/~~X~~/1/~~X~~) Gruppe-Nr: ..11..

Name: ..... Fleig ..... Vorname: ..... Georg .....

Name: ..... Krause ..... Vorname: ..... Marcel .....

Versuch: ..... Aeromechanik ..... (mit/o/~~X~~e) Fehlerrechnung

Betreuer: ..... Malte Langenhorst ..... Durchgeführt am: 15.11.11.

Abgabe am: .....

Rückgabe am: .....

Begründung:

2. Abgabe am: .....

Ergebnis: (+ / 0 / -)

Fehlerrechnung: ja / nein

Datum: .....

Handzeichen: .....

Bemerkungen:



**Aufgabe 2:** Messaufbau: Düse 10cm , Laufstrecke, Messwagen, Testkörper, Sektorkraftmesser.

**2.1.** Rücktrieb und Stirnfläche: Messen Sie bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit (Pot. bei ~8 Skt) den Strömungswiderstand der drei Kreisscheiben sowie den des Haltestiels. Korrigieren Sie die Werte und setzen Sie diese zu den jeweiligen Flächen ins Verhältnis. Welche Folgerungen können Sie aus dieser Messung ziehen?

**2.2.** Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit: Messen Sie bei zwei Kreisscheiben den Strömungswiderstand in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (Staudruck  $p_d$ ). Tragen Sie den Widerstand über dem Staudruck auf und schließen Sie auf die Form der Abhängigkeit.

**2.3.** Rücktrieb und Körperform: Messen Sie bei konstanter Drehzahl den Strömungswiderstand der rotationssymmetrischen Widerstandskörper (Kugel, Halbkugel, Stromlinienkörper glatt) in beiden Richtungen. Stellen Sie nun die Widerstandsformel zusammen und bestimmen Sie die Widerstandsbeiwerte  $c_w$  der Widerstandskörper. Diskutieren Sie das Ergebnis und vergleichen Sie mit Tabellenwerten.

**2.4.** Bestimmen Sie den  $c_w$  Wert eines Modellautos. Sie können auch ein eigenes Modell mitbringen (Die Stellfläche ist ungefähr  $8 \times 10 \text{ cm}^2$  groß).

**Aufgabe 3:** Nachdem die Faktoren bekannt sind, die den schädlichen Widerstand beeinflussen, wenden Sie sich dem Aufbau und der Wirkungsweise eines Tragflügels zu. Installieren Sie die Auftriebswaage und den Treibflügel gemäß der Gebrauchsanweisung.

**3.1.** Messen Sie bei konstanter Windgeschwindigkeit den Auftrieb und den Strömungswiderstand in Abhängigkeit vom Anstellwinkel  $\alpha$  ( $\alpha = 5^\circ; -20^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ ). Tragen Sie den Widerstand sowie den Auftrieb über dem Anstellwinkel auf und außerdem die Auftriebswerte über dem Widerstand (Polarendiagramm). Bestimmen Sie aus dem Polarendiagramm die günstigste Gleitzahl. Diskutieren Sie die Bedeutung dieser Größe. Was sollte zur Verbesserung der Flugeigenschaften unternommen werden?

**3.2.** Messen Sie bei konstanter Windgeschwindigkeit den Druck an den Meßstellen des Tragflächenmodells in Abhängigkeit vom Anstellwinkel  $\alpha$ . Zeichnen Sie der Anschaulichkeit wegen in Querschnittsskizzen der Tragfläche bei einigen Anstellwinkeln die 'Druckvektoren' an den Meßstellen ein. Der Druck ist eine skalare Größe; welche Richtung ist gemeint? Schließen Sie auf den Auftrieb. Erklären Sie mit Hilfe der Ergebnisse aus Aufgabe 3.1. und 3.2. die Wirkungsweise einer Tragfläche.

#### Literatur:

Bergmann-Schäfer: *Experimentalphysik, Bd.1, 9.Aufl., Kap.6*

Bohl,W.: *Technische Strömungslehre* (Abschnitte Grundbegriffe, Umströmung von Körpern, Tragflügel, Geschwindigkeitsmessung, Tafeln Widerstandsziffern. Tafel Polaren eines Tragflügels)

K.Heidemann (Fa.PHYWE): *Weshalb Ballone, Drachen und Flugzeuge fliegen können* (für Schulunterricht und Schulpraktika gedacht)

PHYWE-Hochschulpraktikum Physik: *Auftrieb und Strömungswiderstand*

Thomas,F.: *Segelflug und Segelflugzeuge*, Spektrum der Wissenschaft, Juli 1985

#### Zubehör:

Winderzeuger mit stufenloser Drehzahleinstellung, maximale Drehzahl 2550 U/min (siehe Abbildung 2), Einlaufzeit Motor ca. 3 min., Einstellzeit bei Drehzahländerung ca. 30 sec.

Düse zum Aufstecken ( $\varnothing$  100 mm) mit anschraubbarer Messstrecke (Länge 500 mm) für passenden Messwagen

Sektor-Kraftmesser 0,6 N und Auftriebswaage aufsteckbar auf den Messwagen

Feinmanometer (mit gefärbter Petroleumfüllung, 0 bis 310 Pa und Skala zum Ablesen der Windgeschwindigkeit, Manometerröhre beidseitig über Schläuche anschließbar); Prandtl'sches Staurohr

Tragflächenmodell (Skizze unten); Satz Kreisscheiben ( $\varnothing$  40 mm, 56 mm, 80 mm); Satz Widerstandskörper (Halbkugel, Vollkugel, Stromlinienkörper glatt, grösster Durchmesser jeweils 56 mm)

Stellfläche für Modellauto

Gemeinsam werden benutzt: 10cm-Düse (max. 19cm/s); 5cm-Düse (max. 22cm/s); Venturidüse mit montierten acht U-Rohr-Manometern an den Druck-Messstellen; spezielle Platte mit Distanzstiften und Meßbohrungen zum 'Aerodynamischen Paradoxon'; Scheibensonde; Rohrsonde; Modelldüse (Paar gebogene Leitbleche mit Meßbohrungen), Torsions-Federwaage (Meßbereiche 0.8N und 1.6N).

# **Physikalisches Anfängerpraktikum P1**

**Versuch:  
P1-24,26,28  
Aeromechanik**

Schriftliche Ausarbeitung von Georg Fleig  
Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:  
15.11.2011

# Einführung

Bei diesem Versuch behandeln wir die wichtigsten physikalischen Gesetze, die das Fliegen von Körpern mit einer größeren Dichte als Luft ermöglichen.

## Statischer und dynamischer Druck

Bei der Druckmessung in einem Fluid unterscheidet man allgemein zwischen zwei Drücken, dem statischen und dem dynamischen Druck. Der statische Druck wird durch die Gewichtskraft des Fluides und durch die Brownsche Bewegung der Teilchen des Fluides erzeugt. Er ist abhängig von der Gesamtoberfläche des zu betrachtenden Körpers und wirkt immer normal zu dieser.

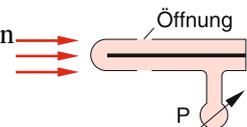
Der dynamische Druck wird durch die kinetische Energie des Fluides erzeugt, bei ruhenden Fluiden setzt sich der Gesamtdruck also nur aus dem statischen Druck zusammen. Für den dynamischen Druck gilt folgender Zusammenhang:

$$p_d = \frac{\rho}{2} u^2$$

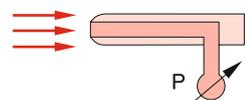
## Methoden der Druckbestimmung

Es gibt verschiedene Messmethoden um die verschiedenen Anteile der Drücke zu messen. Hier sollen drei dieser Methoden kurz vorgestellt werden.

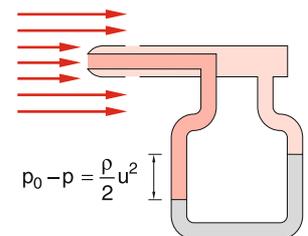
Mittels einer Drucksonde lässt sich der statische Druck messen. Sie besitzt Öffnungen parallel zur Strömungsrichtung des Fluids.



Das sogenannte Pitotrohr besitzt Öffnungen senkrecht zur Strömungsrichtung, daher wird mit ihm der statische und der dynamische Druck, also der Gesamtdruck, gemessen.



Kombiniert man diese beiden Messmethoden, erhält man die sogenannte Prandtlsonde. Mit ihr lässt sich der dynamische Druck bestimmen.



## Kontinuitätsgleichung

Bei der Verwendung inkompressibler Medien gilt die Kontinuitätsgleichung, welche besagt, dass bei engerem Querschnitt die Geschwindigkeit größer wird und andersrum.

$$A_1 u_1 \rho = A_2 u_2 \rho$$

Wobei  $u$  die Strömungsgeschwindigkeit und  $A$  die Querschnittsfläche des Mediums ist.

## Kraft auf einen umströmten Körper

Auf einen Körper, der von einem Medium (Flüssigkeit/Gas) umströmt, wird wirkt folgende Kraft:

$$F = c_W p_d A = c_W \frac{\rho}{2} u^2 A$$

$c_W$  ist der Strömungswiderstandskoeffizient.

## Bernoulli-Gleichung

Die Bernoulli-Gleichung erklärt, woher die Kraft stammt, die ein Medium bei geringerem Querschnitt beschleunigt. Diese Kraft wird bei strömenden Fluiden durch einen Druckgradienten erzeugt. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$p_0 = p + p_d = p + \frac{\rho}{2}u^2$$

Hier ist  $p_0$  der Gesamtdruck,  $p_d$  der dynamische bzw. Staudruck und  $p$  der statische Druck.

## Demonstrationsversuche

Die Demonstrationsversuche sollen den korrekten Umgang mit den Messinstrumenten lehren sowie zum Verständnis des Druck-Geschwindigkeitsgesetzes beitragen. Sie werden gemeinsam mit den Partnergruppen durchgeführt.

### Aufgabe D.1

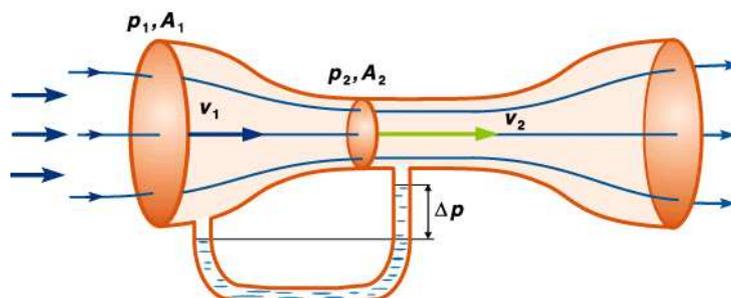
Mit einer Scheibensonde soll parallel zur Strömungsrichtung bei konstanter Windgeschwindigkeit der Druck gemessen werden und mit einer Druckmessung senkrecht zur Strömungsrichtung verglichen werden. Wir erwarten, dass bei der senkrechten Messung der angezeigte Druck am Manometer geringer ist, als bei der parallelen Messung, da bei letzterer neben dem statischen Druck zusätzlich der dynamische Druck gemessen wird.

### Aufgabe D.2

Die Messungen aus D.1 sollen nun mit variabler Windgeschwindigkeit mit der Scheibensonde sowie einer Rohrsonde senkrecht zur Strömungsrichtung wiederholt werden. Dabei erwarten wir, dass der statische Druck konstant bleibt und sich nur der dynamische Druck bei steigender Windgeschwindigkeit verändert. Bei senkrechter Messung mit der Rohrsonde messen wir den statischen Druck. Dieser lässt sich mit der Parallelmessung der Scheibensonde vergleichen, die ebenfalls den statischen Druck liefert. Wir vermuten, dass die Messung mit der Rohrsonde ungenauer ist, da durch das Senkrechtstellen zur Strömungsrichtung Verwirbelungen auftreten.

Um den dynamischen Druck zu messen, kann man eine Kombination aus beiden Messinstrumenten nehmen und die Differenz von Gesamtdruck und statischem Druck bilden. Diese entspricht gerade dem dynamischen Druck.

### Aufgabe D.3



Es soll der statische sowie der Gesamtdruck bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten im Venturirohr (siehe Schema) gemessen werden.

Wir erwarten wegen der Kontinuitätsgleichung und der Bernoulli-Gleichung, dass der dynamische Druck umgekehrt proportional zum Durchmesser des Rohres ist. Im engeren Bereich des Rohres wird der dynamische Druck also steigen und der statische sinken, da der Gesamtdruck erhalten ist. Allerdings kann es wegen Reibung und Verwirbelungen zu einer Differenz des statischen Drucks vor und nach der Engstelle kommen, da es sich bei der Luft nicht um ein ideales Fluid handelt.

## Aufgabe D.4

Dieser Versuch soll das aerodynamische Paradoxon demonstrieren. Dazu werden zwei Kreisscheiben eng aneinander gebracht und Luft soll in radialer Richtung zwischen ihnen nach außen strömen. Man erwartet, dass dadurch die beiden Platten auseinandergedrückt werden, allerdings passiert genau das Gegenteil. Dies liegt daran, dass durch das Strömen der Luft der statische Druck im Zwischenraum gegenüber dem dynamischen Druck abnimmt und so geringer als der umliegende statische Druck ist. Durch diesen Druckunterschied des statischen Drucks wirkt eine Kraft auf die beiden Platten, die sie aufeinander zubewegt.

Der theoretische Druckverlauf lässt sich mit der Bernoulli-Gleichung berechnen. Nach ihr wird der statische Druck in der Mitte der Scheibe am geringsten sein und nach außen hin, wegen der Vergrößerung der durchströmten Fläche, zunehmen. Für den Verlauf des dynamischen Druckes gilt genau das Umgekehrte.

# Aufgabe 1: Vorversuche

## Aufgabe 1.1

Durch Messen des dynamischen Drucks  $p_d$  an verschiedenen Orten im Luftstrom, versuchen wir Grenzen für die Bereiche zu finden, in welchen die Windgeschwindigkeit einigermaßen ortsunabhängig ist. Dazu variieren wir den Abstand  $l$  zum Düsenrand und den Abstand  $r$  vom Düsenmittelpunkt. Außerdem legen wir einen Ort fest, an welchem die später zu untersuchenden Objekte platziert werden, um möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten.

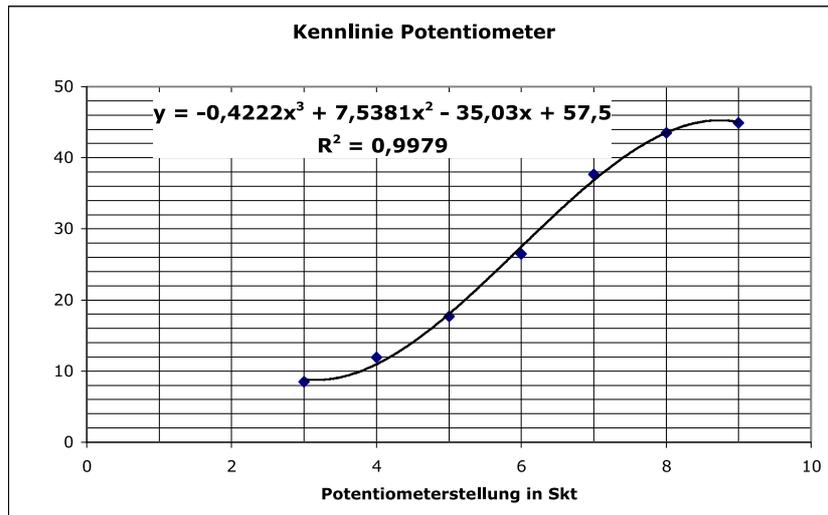
## Aufgabe 1.2

An dem eben festgelegten Ort soll nun für spätere Versuche die Windgeschwindigkeit  $u$  in Abhängigkeit von der Motordrehzahl gemessen werden. Die Windgeschwindigkeit lässt sich über den dynamischen Druck  $p_d$  bestimmen. Dafür gilt nach der Bernoulli-Gleichung folgender Zusammenhang:

$$p_d = \frac{\rho}{2} u^2 \Rightarrow u = \sqrt{\frac{2}{\rho} p_d}$$

Für  $\rho$  wird die Dichte von Luft  $\rho \approx 1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  verwendet.

Um die Drehzahl einzustellen verwenden wir ein Potentiometer. Der Zusammenhang zwischen Potentiometerstellung und Drehzahl ist durch die Kennlinie aus der Versuchsanleitung gegeben:



## Aufgabe 2: Messungen an verschiedenen Körpern

In den folgenden Versuchen werden wir Messungen an verschiedenen Körpern durchführen und dabei deren aerodynamische Eigenschaften untersuchen.

### Aufgabe 2.1 - Rücktrieb und Stirnfläche

Wir messen bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit den Strömungswiderstand  $F_W$  von verschiedenen Kreisscheiben und dem verwendeten Haltestiel. Von den gemessenen Werten wird der Strömungswiderstand des Haltestils abgezogen um den tatsächlichen Wert zu erhalten. Für den theoretischen Wert von  $F_W$  gilt:

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

Wir erwarten daher einen linearen Zusammenhang zwischen der Größe der Scheibenfläche und dem Strömungswiderstand.

### Aufgabe 2.2 - Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit

Nun messen wir bei zwei verschiedenen Kreisscheiben den Strömungswiderstand  $F_W$  bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten  $u$  über den Staudruck  $p_d$ . Aus den Formeln, die in der Einführung besprochen wurden, erkennt man direkt den linearen Zusammenhang zwischen dem Strömungswiderstand und dem Staudruck. Daher erwarten wir beim Auftragen von  $F_W$  über  $p_d$  eine Gerade.

### Aufgabe 2.3 - Rücktrieb und Körperform

Um den Zusammenhang zwischen Rücktrieb und Körperform zu bestimmen, messen wir bei einigen rotationssymmetrischen Körpern (Kugel, Halbkugel, glatter Stromlinienkörper) den Strömungswiderstand in beiden Richtungen bei konstanter Motordrehzahl.

Es wurde in den beiden vorigen Versuchen bereits gezeigt, dass  $F_W \sim p_d$  und  $F_W \sim A$  gilt, daher gehen wir davon aus, dass die theoretische Formel  $F = c_W p_d A$  korrekt ist und wir stellen diese nach dem

Strömungswiderstandskoeffizienten  $c_W$  um:

$$c_W = \frac{F_W}{p_d A}$$

Den Wert für die Fläche  $A$  lässt sich direkt aus den Angaben der Versuchsbeschreibung ( $d_{max} = 56mm$ ) berechnen:

$$A = \pi \left( \frac{d_{max}}{2} \right)^2 = 2,46 \cdot 10^{-3} m^2$$

Durch bestimmen von  $F_W$  lässt sich also auf den Strömungswiderstandskoeffizienten  $c_W$  schließen.

Wir erwarten, dass der glatte Stromlinienkörper den geringsten  $c_W$ -Wert, unabhängig von der Richtung, aufweist und die Halbkugel mit der Öffnung gegen die Windrichtung den größten  $c_W$ -Wert besitzt.

### **Aufgabe 2.4 - $c_W$ -Wert eines Modellautos**

Wir bestimmen den  $c_W$ -Wert eines Modellautos entsprechend wie in Aufgabe 2.3.

## **Aufgabe 3: Messungen an einem Tragflügel**

Nachdem wir uns in Aufgabe 2 mit den unerwünschten Faktoren des Strömungswiderstandes beschäftigt haben, analysieren wir nun im Folgenden Wirkungsweise und Aufbau einen Tragflügels.

### **Aufgabe 3.1 - Auftrieb**

Bei konstanter Windgeschwindigkeit sollen Auftrieb  $F_A$  und Strömungswiderstand  $F_W$  bei verschiedenen Anstellwinkeln  $\alpha$  bestimmt werden. Anschließend sollen Strömungswiderstand sowie Auftrieb über  $\alpha$  aufgetragen werden und ein Polardiagramm durch Auftragen der Auftriebswerte über den Strömungswiderstand erstellt werden. Der Quotient aus  $F_W$  und  $F_A$  stellt dabei die Gleitzahl  $\epsilon$  dar:

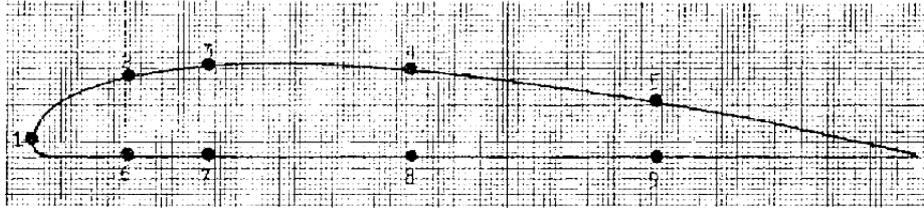
$$\epsilon = \frac{F_W}{F_A}$$

Die kleinste (günstigste) Gleitzahl ist also genau an dem Punkt zu finden, an welchem die Steigung der Kurve im Polardiagramm am größten ist.

Zur Verbesserung der Flugeigenschaften könnte man nun entweder den Auftrieb erhöhen oder den Widerstand verringern. Ersteres erreicht man durch eine starke Wölbung an der Oberseite des Flügels, wodurch Unterdruck und dadurch Auftrieb erzeugt wird. Den Widerstand kann man durch Verwendung glatterer Materialien senken.

### **Aufgabe 3.2 - Druck**

Wir arbeiten wieder mit einer konstanten Windgeschwindigkeit und messen den Druck an verschiedenen Stellen des Tragflächenmodells. Es sollen nun "Druckvektoren" bei verschiedenen Anstellwinkeln in Querschnittsskizzen eingezeichnet werden. Die Punkte, in welchen der Druck gemessen werden soll, sind in folgendem Querschnitt dargestellt:



Der Druck ist eine skalare Größe, allerdings kann man Normalenvektoren senkrecht zur Oberfläche einzeichnen, deren Länge dem gemessenen Druck entsprechen. Dabei wird bei Überdruck der Pfeil in die Tragfläche gerichtet, bei Unterdruck aus der Tragfläche heraus.

Durch Betrachten dieser Messergebnisse kann man dann direkt auf den Auftrieb schließen. Wir erwarten, dass dieser bei einem positiven Anstellwinkel am größten ist. An der Oberseite des Flügels herrscht also Unterdruck, der für Austrieb sorgt. Wenn gleichzeitig an der Unterseite ein Überdruck herrscht, wirkt dieser als zusätzliche Kraft auf die Tragfläche nach oben.

## Quellenangabe

Demtröder, W.: Experimentalphysik 1

Meschede, D.: Gerthsen Physik

Bergmann, L. / Schaefer, C.: Band 1 - Mechanik, Akustik, Wärme

Schema des Venturirohrs: [http://www.sprott.net/science/physik/taschenbuch/daten/bild\\_3/06\\_0440.gif](http://www.sprott.net/science/physik/taschenbuch/daten/bild_3/06_0440.gif)

Grafiken der Druckmessinstrumente: Bergmann, L. / Schaefer, C.: Band 1 - Mechanik, Akustik, Wärme

# **Physikalisches Anfängerpraktikum P1**

**Versuch:  
P1-24,26,28  
Aeromechanik**

Schriftliche Vorbereitung von Marcel Krause (mrrrc@leech.it )  
Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:  
15.11.11

# Theoretische Grundlagen

## Statischer und dynamischer Druck

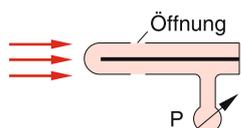
Der messbare Druck in einem Fluid setzt sich stets aus statischem und dynamischem Druck zusammen. Der statische Druck rührt von der Gewichtskraft der Flüssigkeit zum einen und von der Brownschen Bewegung der Bestandteile des Fluids zum anderen her. Er wirkt stets normal auf alle Oberflächen, die das Fluid umgeben, und je größer diese Oberflächen sind, desto größer wird auch die wirksame Kraft. Der dynamische Druck stammt von der kinetischen Energie des Fluids. Für ihn gilt:

$$p_d = \frac{\rho}{2} u^2$$

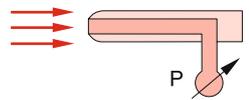
Liegt eine ruhende Flüssigkeit vor, so ist der dynamische Druckanteil gleich Null. Einen genaueren Zusammenhang liefert die unten stehende Bernoulli-Gleichung.

## Instrumente zur Druckbestimmung

Je nachdem, welche Anteile des Drucks (siehe oben) man bestimmen möchte, bieten sich verschiedene Instrumente an.

 Die erste Möglichkeit der Druckmessung bietet eine Drucksonde, wie sie in nebenstehender Skizze aufgezeigt ist. Eine solche Sonde besitzt Öffnungen, welche parallel zur Strömungsrichtung in das Fluid gebracht werden müssen. Dadurch misst man beispielsweise mithilfe eines Manometers nur den statischen Druck des Fluids.

Eine zweite Möglichkeit bietet sich mit einem sogenannten Pitotrohr, welches schematisch rechts zu sehen ist. Da die Öffnung senkrecht zur Strömung eingebracht wird, misst man hier nicht nur den statischen Druck, sondern zusätzlich auch den dynamischen Druck und damit den Gesamtdruck.

 Abschließend bietet sich als dritte Möglichkeit eine Kombination der obigen Messmethoden an. Links ist schematisch eine Prandtlsonde aufgezeigt. Durch die Kombination aus Drucksonde und Pitotrohr heben sich die statischen Druckanteile gerade auf, sodass man hier nur den dynamischen Druck misst.

## Kraft auf einen umströmten Körper

Die Kraft, die ein Körper erfährt, wenn er von einem Fluid umströmt wird, ist proportional zur Dichte  $\rho$  des Fluids und proportional zu dessen Strömungsgeschwindigkeit  $u$  im Quadrat. Außerdem ist diese Kraft proportional zur Fläche  $A$  des umströmten Körpers. Damit gilt folgende Gesetzmäßigkeit:

$$F = c_W \cdot p_d \cdot A = c_W \cdot \frac{\rho}{2} u^2 \cdot A$$

## Kontinuitätsgleichung

Sofern das strömende Fluid hinreichend inkompressibel ist, gilt die Kontinuitätsgleichung

$$A_1 u_1 = A_2 u_2$$

woraus folgt, dass bei konstantem Materiestrom das Fluid in einem engeren Querschnitt eine größere Geschwindigkeit besitzt, et vice versa.

## **Bernoulli-Gleichung**

Aus der Kontinuitätsgleichung folgt, dass ein Fluid der Dichte  $\rho$  von einer Stelle großen Querschnitts zu einer Stelle kleinen Querschnitts eine Beschleunigung erfahren haben muss. Diese Beschleunigung rührt von einer Kraft her, die bei strömenden Fluiden von Druckgradienten bedingt werden. Es folgt daraus, dass man am Ort größerer Geschwindigkeit  $u$  einen niedrigeren Druck vorfinden muss. Diese Gesetzmäßigkeit findet sich in der Bernoulli-Gleichung wieder:

$$p_0 = p + p_d = p + \frac{\rho}{2}u^2$$

Dabei bezeichnet  $p_0$  den Gesamtdruck,  $p$  den statischen Druck und  $p_d$  den dynamischen Druck (auch Staudruck genannt).

## **Demonstrationsversuche**

Zunächst betrachten wir gemeinsam mit den Partnergruppen allgemeine Demonstrationsversuche zur Aeromechanik. Dabei werden wir die verwendeten Messmethoden näher kennen lernen sowie ein Verständnis für Druck-Geschwindigkeits-Abhängigkeiten entwickeln.

### **Aufgabe D.1**

Im ersten Demonstrationsversuch betrachten wir die Feinmanometeranzeige einer Scheibensonde in zwei verschiedenen Ausrichtungen zu einer Strömung, die durch konstante Motordrehzahl verursacht wird. Im ersten Fall bringen wir die Scheibensonde parallel zur Strömungsrichtung ein, im zweiten Fall senkrecht zu ihr. Dabei wird erwartet, dass das Manometer im ersten Fall schwächer ausschlägt als im zweiten, denn bei einer Stellung parallel zur Strömung wird entsprechend einer Drucksonde nur der statische Druck erfasst, wohingegen bei einer Stellung senkrecht zur Strömung, wie im zweiten Fall, zusätzlich noch der dynamische Druck (Staudruck), und somit der Gesamtdruck erfasst wird.

### **Aufgabe D.2**

Wir variieren nun die erste Versuchsanordnung insofern, als dass wir die Motordrehzahl und damit die Windgeschwindigkeit schrittweise erhöhen. Wieder werden mit der Scheibensonde parallel und senkrecht zur Strömung mithilfe des Manometers Drücke bestimmt. Danach wird anstelle der Scheibensonde eine Rohrsonde für dieselben Messungen verwendet. Insgesamt ergeben sich also folgende Versuchskombinationen:

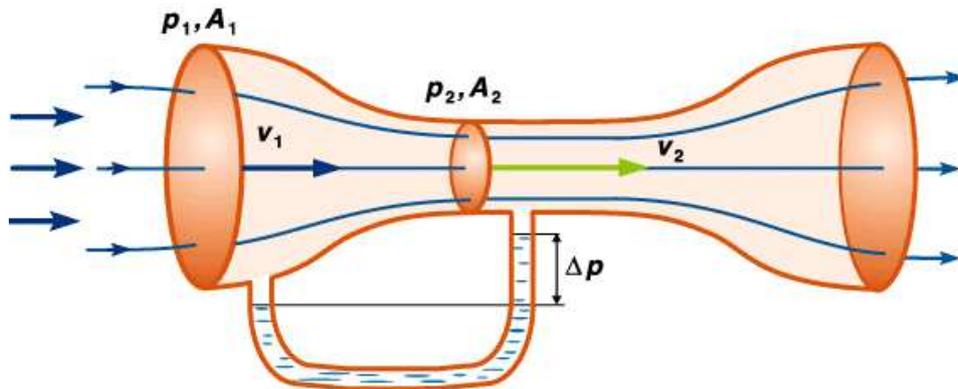
- a) Scheibensonde parallel zur Strömung
- b) Scheibensonde senkrecht zur Strömung
- c) Rohrsonde parallel zur Strömung
- d) Rohrsonde senkrecht zur Strömung

Wir messen dabei bei den Versuchsanordnungen a) und d) jeweils den statischen Druck und bei b) und c) den Gesamtdruck.

Es lässt sich vermuten, dass die Scheibensonde für die Messung des Gesamtdrucks nicht allzu gut funktionieren sollte, da an ihr wesentliche Verwirbelungen auftreten könnten. Aus demselben Grund wäre die Rohrsonde wohl für eine Messung des statischen Drucks weniger geeignet, da sie dafür senkrecht in die Strömung gebracht werden muss und sich dadurch ebenfalls Verwirbelungen ausbilden könnten.

Für die Messung des dynamischen Drucks bieten sich eine Prandtlsonde an. Ansonsten kann man auch eine Kombination obiger Verfahren z.B. aus a) und c) nutzen und dann die Differenz der beiden Drücke bilden. Diese ist dann gerade der dynamische Druck.

### Aufgabe D.3

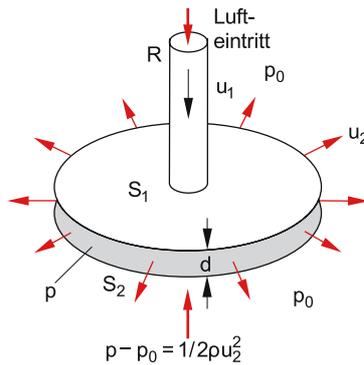


In dieser Versuchsanordnung betrachten wir ein Venturirohr, welches schematisch in obiger Skizze zu sehen ist. Dabei wollen wir den statischen Druck an verschiedenen Stellen des Rohres messen und skizzieren und überdies den Gesamtdruck längs des Rohrs beobachten.

Mittels der Bernoulli-Gleichung und der Kontinuitätsgleichung folgt, dass der dynamische Druck umgekehrt proportional zum Rohrradius ist. An Stellen engen Rohrdurchschnitts erhält man so größere Strömungsgeschwindigkeiten und größere dynamische Druckanteile. Da aber der Gesamtdruck konstant bleibt, nimmt der statische Druck nach der Bernoulli-Gleichung an dieser Stelle ab. Es ist also zu erwarten, dass bei Verkleinerung des Rohres der statische Druck abnimmt und dass dieser bei minimalem Rohrdurchmesser ebenfalls ein Minimum annimmt, um danach wieder anzusteigen. Aufgrund von Reibungseffekten dürfte der statische Druck bei vergleichbaren Rohrdurchmessern vor und nach der Engstelle eine Differenz aufweisen, was bei idealen Fluiden nicht der Fall wäre.

Aufgrund der schwierigen Messung und der Tatsache, dass es sich bei strömender Luft nicht um ein ideales Fluid handelt und Reibungseffekte sowie Verwirbelungen auftreten, muss mit teils erhebliche Abweichungen von theoretischen Werten gerechnet werden.

## Aufgabe D.4



Wir betrachten eine Versuchsanordnung zum aerodynamischen Paradoxon. Dabei experimentieren wir an zwei eng aneinanderliegenden Kreisscheiben, zwischen denen Luft radial vom Zentrum nach außen strömen soll. Die Versuchsanordnung ist links skizziert. Intuitiv entsteht der Eindruck, dass die untere Scheibe durch die Luftströmung von der oberen abgestoßen werden müsste; paradoxerweise wird die untere Scheibe von der oberen aber angezogen. Dies lässt sich wieder mithilfe der Bernoulli-Gleichung erklären, denn durch den Luftstrom ergibt sich ein Anteil an dynamischem Druck und ein Anteil an statischem Druck, wobei letzterer geringer ist als in unmittelbarer äußerer Umgebung der Kreisscheiben. Da aber nur der statische Druck normal auf Oberflächen wirkt, entsteht innerhalb der Kreisscheiben ein Unterdruck und sie ziehen sich zusammen.

Für den Verlauf des Drucks kann man ebenfalls die Bernoulli-Gleichung betrachten. Vom Zentrum aus bewegt sich die Luft radial nach außen. Dabei nimmt die durchströmte „Querschnittsfläche“ nach außen hin zu, womit unmittelbar folgt, dass die Strömungsgeschwindigkeit abnehmen muss. Dadurch lässt sich schließen, dass im Zentrum der dynamische Druck am größten und der statische Druck am geringsten sein muss. Nach außen hin sinkt der dynamische Druck und der statische steigt.

## Aufgabe 1: Vorversuche

Wir führen zunächst einige Vorversuche durch, die für die nachfolgenden Versuchsreihen wesentlich sind.

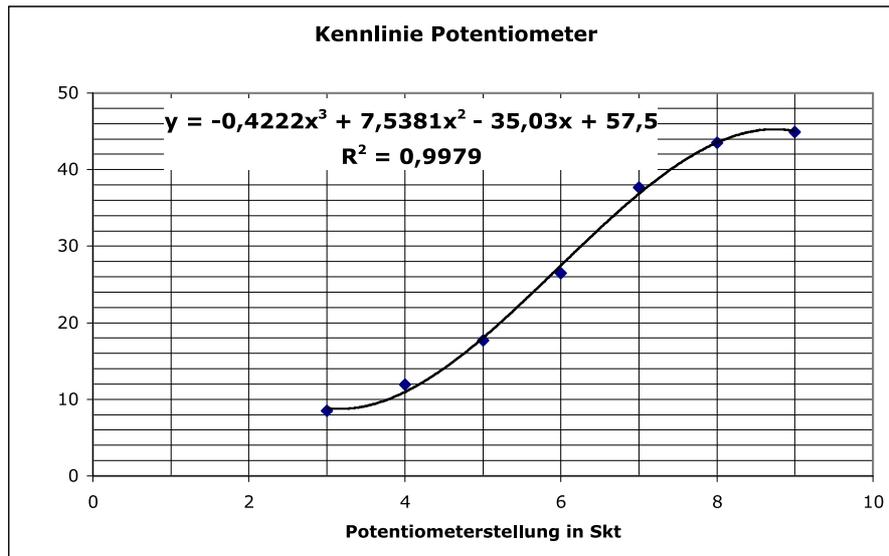
### Aufgabe 1.1

Wir versuchen herauszufinden, in welchem Bereich hinter der Düse ungefähr konstante Windgeschwindigkeiten angenommen werden können. Dabei werden wir den dynamischen Druck  $p_d$  an verschiedenen Abständen  $l$  zur Düse sowie an unterschiedlichen Versätzen  $r$  vom Zentrum der Düse messen und auswerten, in welchen Bereichen der dynamische Druck, und damit nach der Bernoulli-Gleichung auch die Strömungsgeschwindigkeit, annähernd ortsunabhängig sind.

Es ist zu erwarten, dass sich der ideale Bereich bei mittleren Abständen von der Düse vorfinden wird, da dort der Abfall der Windgeschwindigkeit noch nicht zu groß ist, die Strömung aber nicht mehr so stark ist, dass ein dort platzierter Körper zu starke Verwirbelungen hervorrufen würde. Außerdem dürfte bei größerem Versatz  $r$  vom Düsenmittelpunkt der dynamische Druck ebenfalls abnehmen.

### Aufgabe 1.2

Bei diesem Versuch geht es uns darum, die Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit  $v$  und der Motordrehzahl kennenzulernen. Dabei messen wir am Ort nahezu konstanter Windgeschwindigkeit (Aufgabe 1.1) den dynamischen Druck in Abhängigkeit der Drehzahl. Da diese über das Potentiometer eingestellt wird, nutzen wir zur Bestimmung der Drehzahl die Kennlinie des Potentiometers aus dem Aufgabenblatt:



Aus der Bernoulli-Gleichung kann man den Zusammenhang zwischen Luftgeschwindigkeit  $v$  und dynamischem Druck  $p_d$  berechnen, wobei  $\rho$  die Dichte der Luft mit  $\rho \approx 1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ist.

$$p_d = \frac{\rho}{2} v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2}{\rho} p_d}$$

## Aufgabe 2: Messungen an Probekörpern

In den nachfolgenden Versuchsreihen wollen wir aeromechanische Versuche an Probekörpern durchführen. Dabei werden wir die Faktoren herausarbeiten, welche maßgeblich den Luftwiderstand beeinflussen.

### Aufgabe 2.1

Es wird der Strömungswiderstand  $F_W$  dreier unterschiedlicher Kreisscheiben sowie des verwendeten Haltestiels bei konstanter Windgeschwindigkeit mithilfe eines Kraftmessgeräts bestimmt. Dabei werden wir den Zusammenhang zwischen Rücktrieb und Stirnfläche kennenlernen. Der Strömungswiderstand des Stiels wird benötigt, um die Werte für die Kreisscheiben, falls nötig, zu korrigieren:

$$F_{W,korr} = F_{W,scheibe} - F_{W,stiell}$$

Der Strömungswiderstand selbst wird theoretisch mit der Formel

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

bestimmt. Nach der Korrektur wird also ein linearer Zusammenhang zwischen Scheibenfläche und Strömungswiderstand erwartet.

### Aufgabe 2.2

Wir messen bei zwei unterschiedlichen Kreisscheiben den Strömungswiderstand  $F_W$  in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit  $u$ . Dabei werden wir den Zusammenhang zwischen Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit (und damit auch dem Staudruck  $p_d$ ) erforschen.

Dazu messen wir den Strömungswiderstand in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit. Die Abhängigkeit letzterer von der Potentiometerstellung wurde bereits in Aufgabe 1.2 erörtert, daher werden die Werte dieser Aufgabe übernommen. Zur Auswertung wird der Widerstand über dem Staudruck aufgetragen. Da  $u \propto \sqrt{p_d}$  (siehe Aufgabe 1.2) und  $F_w \propto u^2$  gilt, müsste zwischen dem Strömungswiderstand und dem Staudruck ein linearer Zusammenhang bestehen.

### Aufgabe 2.3

In diesem Versuch geht es um den Zusammenhang zwischen Rücktrieb und der Form des Probekörpers. Wir verwenden dazu einige rotationssymmetrische Probekörper wie eine Kugel, Halbkugel und einen glatten Stromlinienkörper in jeweils beiden Richtungen und messen bei konstanter Motordrehzahl den Strömungswiderstand.

Da wir in Aufgabe 2.1 gezeigt haben, dass  $F_W \propto A$  gilt und in Aufgabe 2.2 überprüft haben, dass  $F_W \propto p_d$  gilt, ist die Formel  $F_W = c_W \cdot \frac{\rho}{2} u^2 \cdot A$  von uns experimentell bestätigt. Damit erhalten wir nach Umstellen eine Formel für den Strömungswiderstandskoeffizienten  $c_W$ :

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

Der größte Durchmesser der Körper beträgt laut Literaturangaben  $d = 56\text{mm}$ , womit sich die Querschnittsfläche  $A$  jedes Körpers errechnet zu

$$A = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 = 2,46 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$$

und der Staudruck für eine Potentiometerstellung von 8 Skalenteilen ergibt sich aus Aufgabe 1.2. Somit werden wir für jeden Körper den Strömungswiderstand  $F_W$  bestimmen und erhalten mit obiger Formel die Strömungswiderstandskoeffizienten  $c_W$ .

Es ist dabei zu erwarten, dass die Halbkugel mit Öffnung in Windrichtung den höchsten  $c_W$ -Wert besitzt und der Stromlinienkörper unabhängig von der Richtung die geringsten  $c_W$ -Werte besitzen.

### Aufgabe 2.4

Abschließend wollen wir noch die  $c_W$ -Werte von Modellautos bestimmen. Dabei gehen wir analog zu Aufgabe 2.3 vor und diskutieren die Ergebnisse.

## Aufgabe 3: Messungen an einem Tragflügel

In Aufgabe 2 haben wir uns ausführlich mit dem Faktoren beschäftigt, die ungewollten Windwiderstand begünstigen. Nun betrachten wir den Aufbau und die Wirkungsweise eines Tragflügels.

### Aufgabe 3.1

Es wird zunächst bei konstanter Windgeschwindigkeit der Auftrieb  $F_A$  und der Strömungswiderstand  $F_W$  in Abhängigkeit des Anstellwinkels  $\alpha$  bestimmt. Dabei sollen wir für den Anstellwinkel Werte einstellen mit  $\alpha \in [-20^\circ, 20^\circ]$ . Der Auftrieb ergibt sich mithilfe der Auftriebswaage. Anschließend werden diese Daten über den Anstellwinkeln aufgetragen.

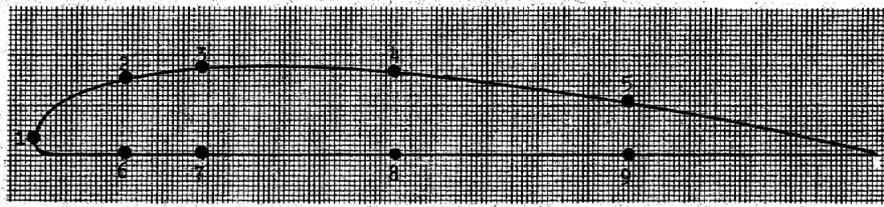
Zusätzlich erstellen wir ein Polardiagramm, indem wir den Auftrieb über dem Widerstand auftragen. Für die Gleitzahl  $\epsilon$  gilt

$$\epsilon = \frac{F_W}{F_A}$$

Da wir im Polardiagramm den Auftrieb über den Widerstand auftragen, erhalten wir dort an der Stelle größter Steigung gerade die inverse Gleitzahl  $\epsilon^{-1}$ , denn dort finden wir das beste Verhältnis aus Auftrieb und Widerstand. Damit können wir die günstigste Gleitzahl  $\epsilon$  bestimmen.

Die Gleitzahl gibt im wesentlichen die Flugeigenschaften des Tragflügels an. Je näher sich die Gleitzahl an Null annähert, desto bessere Flugeigenschaften besitzt der Flügel.

## Aufgabe 3.2



Im letzten Versuch beobachten wir den Druck an den oben aufgezeichneten Druckmessstellen des Flügels in Abhängigkeit des Anstellwinkels. Aus Gründen der Anschaulichkeit werden wir in die obige Skizze die „Druckvektoren“ für jeden Anstellwinkel einzeichnen. Da der Druck selbst eine skalare Größe ist, gibt es Vektoren solcher Art formal nicht. Wir zeichnen Normalenvektoren ein, welche am jeweiligen Messpunkt senkrecht auf der Fläche stehen, und geben ihnen als Länge den jeweils bestimmten Druckwert.

Mittels dieser Ergebnisse werden wir direkt auf den Auftrieb schließen können. Bei positiven Anstellwinkeln dürfte dieser Auftrieb am stärksten sein. Wir müssten also erkennen können, dass die Druckvektoren in diesem Fall an der Oberseite am längsten sind und auf Unterseite vergleichsweise kurz, sodass sich an der Oberseite der Tragfläche ein Unterdruck ausbildet.

## Quellenverzeichnis

Bergmann, L. / Schaefer, C.: Band 1 - Mechanik, Akustik, Wärme

Demtröder, W.: Experimentalphysik 1

Meschede, D.: Gerthsen Physik

Schema des Venturirohrs:

[http://www.sprott.net/science/physik/taschenbuch/daten/bild\\_3/06\\_0440.gif](http://www.sprott.net/science/physik/taschenbuch/daten/bild_3/06_0440.gif)

Skizze zu den Druckmessinstrumenten und dem aerodynamischen Paradoxon:

Bergmann, L. / Schaefer, C.: Band 1 - Mechanik, Akustik, Wärme

# **Physikalisches Anfängerpraktikum P1**

**Versuch:  
P1-24,26,28  
Aeromechanik**

Auswertung

von

Georg Fleig (georg@leech.it )  
Marcel Krause (mrrrc@leech.it )

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:

15.11.11

# Demonstrationsversuche

Die Demonstrationsversuche sollten den korrekten Umgang mit den Messinstrumenten lehren sowie zum Verständnis des Druck-Geschwindigkeitsgesetzes beitragen. Sie wurden gemeinsam mit den Partnergruppen durchgeführt.

## Aufgabe D.1

Wir maßen jeweils mit einer Rohrsonde  $p_R$  sowie einer Scheibensonde  $p_S$  in paralleler und senkrechter Lage zur Strömungsrichtung den Druck. Die Windgeschwindigkeit blieb dabei konstant auf 8 Skt. Parallel bedeutet dabei, dass das Rohr der Messsonde parallel zu dem Luftstrom lag, entsprechendes gilt für die senkrechte Messung. Dabei maßen wir folgende Werte (diese wurden bereits mit dem Offset-Wert von 38 Pa korrigiert):

Ausrichtung	$p_S$ in Pa	$p_R$ in Pa
parallel	112	109
senkrecht	-13	-97

Bei der parallelen Messung wurde jeweils der Gesamtdruck gemessen, bei der senkrechten der statische Druck. Beim Gesamtdruck zeigen beide Sonden etwa denselben Wert, hier können wir daher noch keine bevorzugte Messmethode festlegen. Beim statischen Druck gibt es jedoch große Unterschiede bei den gemessenen Werten. Wir nehmen an, dass die Scheibensonde die genaueren Werte liefert, da es bei der Rohrsonde am Eingang zu Verwirbelungen kommen kann und so die Messung verfälscht wird.

## Aufgabe D.2

Nun sollten wir bei variabler Windgeschwindigkeit mit der Scheibensonde den statischen Druck  $p_s$  sowie den Gesamtdruck  $p_0$  bestimmen. Die Messwerte wurden wieder mit dem Offset-Wert korrigiert und sind im Folgenden dargestellt:

Windgeschw. in Skt.	3	5	7	9
$p_0$ in Pa	2	12	70	124
$p_s$ in Pa	0	-2	-7	-14

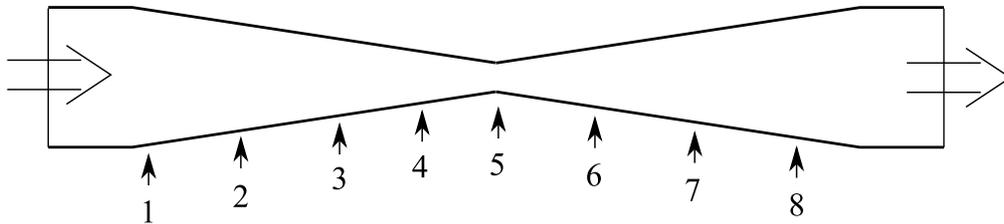
Entgegen unserer Erwartungen blieb bei der Messung mit der Scheibensonde der Gesamtdruck  $p_0$  nicht konstant. Wir vermuten, dass es bei der parallelen Messung mit dieser Sonde wegen Verwirbelungen an der Kreisscheibe zu Messungenauigkeiten kommt. Der statische Druck hat wie erwartet bei steigender Windgeschwindigkeit an Anteil gegenüber dem dynamischen Druck verloren.

Aus diesen Messergebnissen schließen wir darauf, dass die Rohrsonde das bessere Messinstrument zur Bestimmung des Gesamtdrucks ist.

Um den dynamischen Druck zu bestimmen könnte man nun gleichzeitig mit einer Scheibensonde den statischen Druck und mit einer Rohrsonde den dynamischen Druck messen und die Differenz der beiden Messwerte bilden.

### Aufgabe D.3

Wir schlossen ein Venturirohr an den Winderzeuger an und maßen an 8 Stellen im Rohr den statischen Druck mittels einer Flüssigkeitssäule im U-Rohr. In der Messwerttabelle sind die Pegelunterschiede angegeben, die die Veränderung des statischen Drucks darstellen. Negative Vorzeichen stellen dabei einen Unterdruck und positive einen Überdruck dar.



Messstelle	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta h$ in cm	1,7	1,6	1,1	-0,2	-8,7	-2,5	-0,5	-0,1

Wie es die Kontinuitätsgleichung und die Bernoulli-Gleichung vorhersagen, haben wir bei Messstelle 5 mit dem geringsten Rohrdurchmesser auch den geringsten statischen Druck, da dort die Luftgeschwindigkeit und damit der dynamische Druck am höchsten ist. Nach außen hin steigt der statische Druck wieder an. Eigentlich sollte an Punkt 8 etwa der gleiche Druck herrschen, wie an Punkt 1, allerdings kommt es an den Messöffnungen im Rohr zu Verwirbelungen und generell zu Reibung der Luft im gesamten Rohr. Ein weiteres Problem ist, dass die Öffnungen der Messpunkte 1 bis 4 auf der Schräge in Windrichtung liegen und so nicht nur der statische Druck, sondern auch dynamische Druckanteile mitbestimmt werden. Dies verfälscht das Ergebnis. Dennoch wurde in diesem Versuch der reziproke Zusammenhang zwischen statischem Druck und der Durchflussfläche deutlich.

### Aufgabe D.4

Diesen Demonstrationsversuch mussten wir leider auslassen, da die benötigten Kreisscheiben nicht zur Verfügung standen. Wir gehen aber davon aus, dass sich unsere Erwartungen aus der Vorbereitung bestätigt hätten.

## Aufgabe 1: Vorversuche

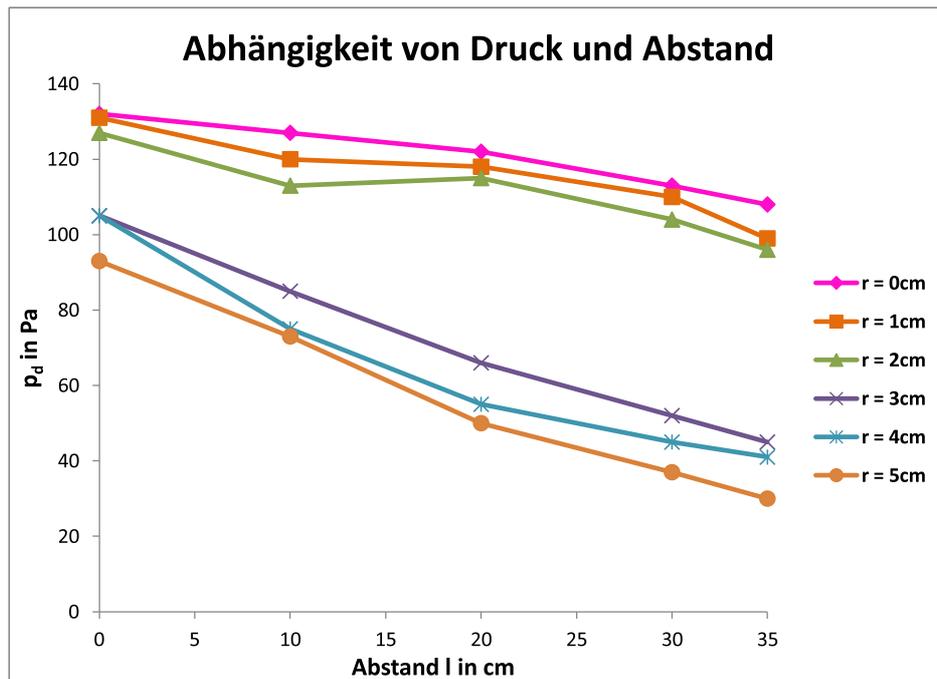
Die Vorversuche dienten uns zum einen zur Bestimmung eines idealen Messbereichs für zukünftige Messungen und zum anderen zur genaueren Kennzeichnung der verwendeten Düse. Da das verwendete Manometer einen Offset-Wert von 0 Pa hatte, mussten die gemessenen Drücke aller weiteren Versuche nicht korrigiert werden.

### Aufgabe 1.1

Es wurde von uns der dynamische Druck  $p_d$  an verschiedenen Positionen hinter der Düse mithilfe einer Prandtlsonde gemessen. Dabei variierten wir sowohl den Versatz  $x$  vom Mittelpunkt der Düse, wie auch die Entfernung  $l$  vom Ende der Düse. Das Potentiometer des Strömungserzeugers war dabei auf 8 Skalenteile eingestellt. Nachfolgend sind tabellarisch die Werte notiert, die wir gemessen haben.

$l$ in cm	$p_{d,0cm}$ in Pa	$p_{d,1cm}$ in Pa	$p_{d,2cm}$ in Pa	$p_{d,3cm}$ in Pa	$p_{d,4cm}$ in Pa	$p_{d,5cm}$ in Pa
0	132	131	127	105	105	93
10	127	120	113	85	75	73
20	122	118	115	66	55	50
30	113	110	104	52	45	37
35	108	99	96	45	41	30

Zur weiteren Auswertung haben wir  $p_{d,x}$  für jeden Versatz  $r$  über die Entfernung  $l$  aufgetragen. Dabei erhielten wir folgendes Schaubild:



Es ist im Schaubild zu erkennen, dass die Kurve für  $x = 0cm$  in guter Näherung linear verläuft. Die Vermutung, dass der Staudruck bei keinerlei Versatz vom Mittelpunkt am geringsten schwankt, bestätigt sich also.

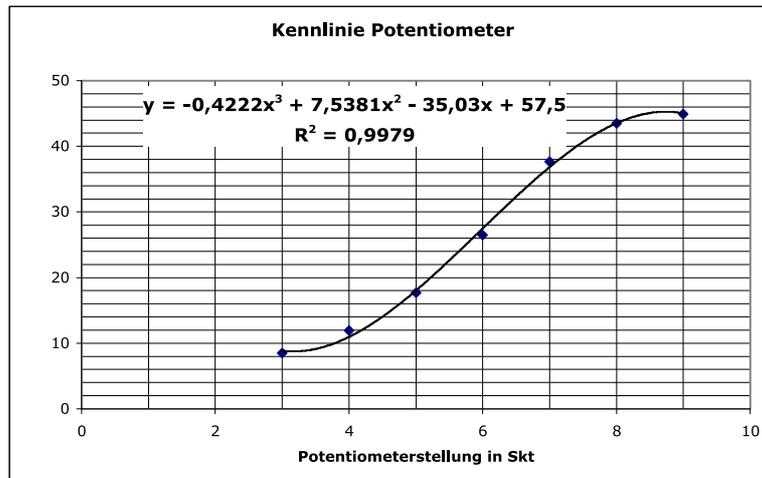
Des Weiteren ist erkennbar, dass sich bei einem Abstand von  $l = 20cm$  von der Düse ungefähr gleiche Staudrücke für die Versätze  $x \in [0cm, 2cm]$  ergeben. Versätze, die darüber liegen, scheinen außerhalb des Hauptluftstroms der Düse zu liegen, und werden in der Argumentation entsprechend berücksichtigt. Wir schließen also, dass bei einem Abstand von  $20cm$  zur Düse der Staudruck nahezu konstant bleibt.

Damit haben wir den optimalen Bereich für weitere Messungen gefunden. Bei einem Versatz von  $x = 0cm$ , also auf der Mittelpunktslinie der Düse, sowie bei einem Abstand von  $l = 20cm$  ist der Staudruck und damit die Windgeschwindigkeit hinreichend konstant. Folglich werden wir diesen Bereich als Versuchsort für unsere weiteren Messungen festlegen.

## Aufgabe 1.2

Da wir den optimalen Bereich in Aufgabe 1.1 nun festgestellt haben, führen wir an diesem einen weiteren Vorbereitungsversuch durch, um die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Potentiometerstellung der Düse kennenzulernen. Dazu bringen wir die Prandtlsonde im Messbereich an, erhöhen schrittweise die Leistung der Düse über das Potentiometer und nehmen abhängig von dieser den Staudruck auf.

Die Drehzahl in Abhängigkeit von der Potentiometerstellung lässt sich mit der Kennlinie bestimmen, die auf dem Aufgabenblatt gegeben ist:



Wir nahmen folgende Werte auf:

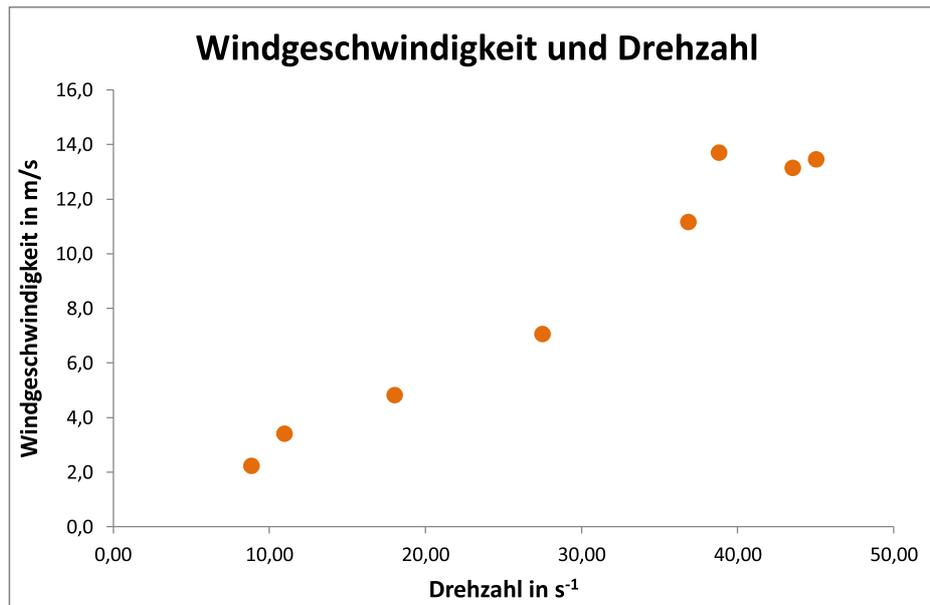
Potentiometer in Skt.	Drehzahl in $s^{-1}$	$p_d$ in Pa	$v$ in m/s
3	8,85	3,0	2,2
4	10,97	7,0	3,4
5	18,03	14,0	4,8
6	27,50	30,0	7,1
7	36,84	75,0	11,2
8	43,53	104,0	13,1
9	45,03	109,0	13,5
10	38,81	113,0	13,7

Die Windgeschwindigkeit  $v$  errechnet sich aus dem Staudruck  $p_d$  folgendermaßen:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} p_d}$$

Dabei ist  $\rho = 1,204 \frac{kg}{m^3}$  die Dichte der trockenen Luft bei einer Raumtemperatur von  $20^\circ C$ .

Wir haben nun die Windgeschwindigkeit über der Drehzahl aufgetragen:



Man erkennt also sehr schön, dass zwischen der Windgeschwindigkeit und der Drehzahl ungefähr ein linearer Zusammenhang besteht. Diese Linearität wird allerdings durch den Messwert für die Potentiometerstellung von 10 Skalenteilen gestört. Dies lässt sich damit begründen, dass die Kennlinie auf dem Aufgabenblatt nur für Werte von 3 bis 9 Skalenteilen bestimmt ist. Deshalb sticht der letzte Wert aus der Reihe heraus.

## Aufgabe 2: Messungen an Probekörpern

Wir führten nun aeromechanische Messungen an diversen Probekörpern durch, um dabei Faktoren zu isolieren, die maßgeblich den Luftwiderstand beeinflussen.

### Aufgabe 2.1

In diesem Versuch haben wir den Zusammenhang zwischen Rücktrieb und Stirnfläche erörtert. Dabei haben wir bei konstanter Windgeschwindigkeit mit Potentiometerstellung bei 8 Skalenteilen den Strömungswiderstand dreier verschieden großer Kreisscheiben (mit  $r = 2,0\text{cm}$ ,  $r = 2,8\text{cm}$  und  $r = 4,0\text{cm}$ ) bestimmt. Die Oberfläche  $A$  der Kreisscheiben errechnet sich mit der Formel aus der Vorbereitung.

Zunächst bestimmten wir mithilfe eines Kraftmessers den Strömungswiderstand  $F_W$  des Haltestiels. Dies ist deshalb wichtig, da der Haltestiel den Strömungswiderstand der Kreisscheiben beeinflusst. Deshalb müssen wir die gemessenen Werte korrigieren mit

$$F_{W,korr} = F_{W,scheibe} - F_{W,sti}el$$

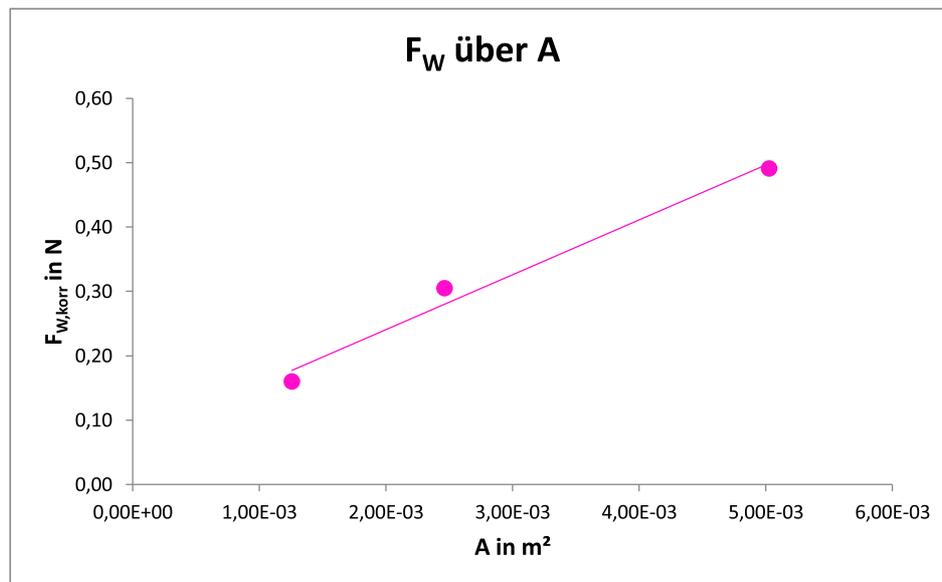
wobei  $F_{W,sti}el$  mit einem Korrekturfaktor gewichtet wird, je nachdem, wie stark die Kreisscheibe den Stiel verdeckt.

Es ergaben sich folgende Messwerte:

$F_{W, \text{stiel}}$ in N	0,03
----------------------------	------

$r_{\text{scheibe}}$ in cm	$A_{\text{scheibe}}$ in $\text{m}^2$	$F_W$ in N	Korrekturfaktor	$F_{W, \text{korr}}$ in N	$F_{W, \text{korr}}/A$ in $\text{N}/\text{m}^2$
2,0	1,26E-03	0,19	1,0	0,16	127,32
2,8	2,46E-03	0,32	0,5	0,31	123,83
4,0	5,03E-03	0,50	0,3	0,49	97,68

Anschließend haben wir  $F_{W, \text{korr}}$  über  $A$  aufgetragen:



Unsere Erwartungen aus der Vorbereitung haben sich bestätigt. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Strömungswiderstand und der Stirnfläche.

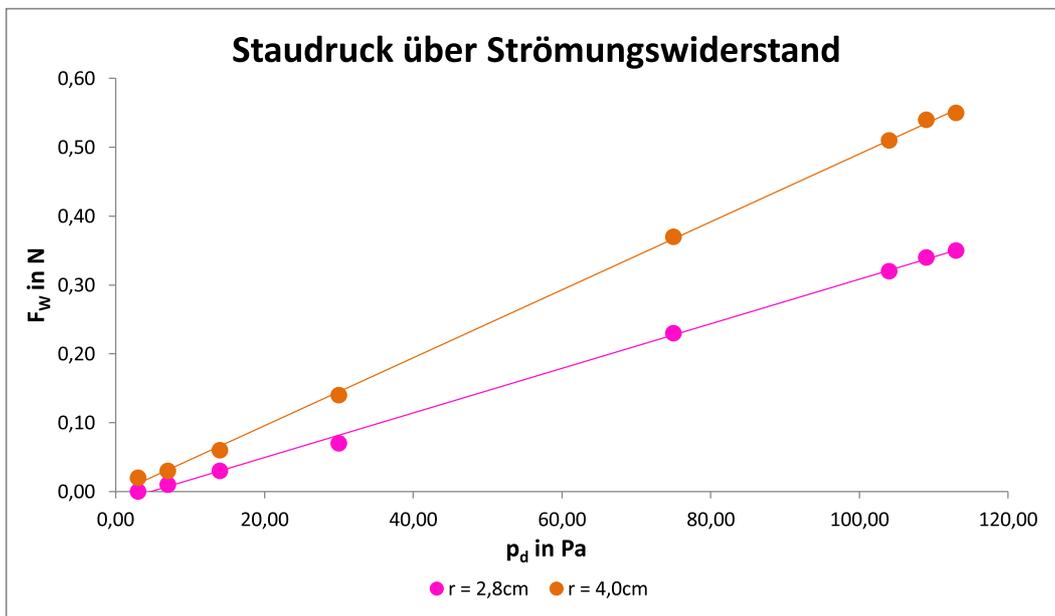
## Aufgabe 2.2

In der zweiten Teilaufgabe haben wir den Zusammenhang zwischen Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit näher betrachtet. Wir haben dabei die zwei größten Kreisscheiben ( $r = 2,8 \text{ cm}$  und  $r = 4,0 \text{ cm}$ ) nacheinander im idealen Messbereich aufgehängt und den Strömungswiderstand in Abhängigkeit vom Staudruck (und damit direkt auch von der Windgeschwindigkeit) gemessen. Der Zusammenhang zwischen Potentiometerstellung, Strömungsgeschwindigkeit und Staudruck ist dabei Aufgabe 1.2 entnommen. In der nachfolgenden Tabelle finden sich unsere Messwerte für die beiden Kreisscheiben wieder.

$r_{\text{scheibe}}$ in cm	2,8		
Potentiometer in Skt.	$v$ in m/s	$p_d$ in Pa	$F_W$ in N
3	2,23	3,00	0,00
4	3,41	7,00	0,01
5	4,82	14,00	0,03
6	7,06	30,00	0,07
7	11,16	75,00	0,23
8	13,14	104,00	0,32
9	13,46	109,00	0,34
10	13,70	113,00	0,35

$r_{\text{scheibe}}$ in cm	4,0		
Potentiometer in Skt.	$v$ in m/s	$p_d$ in Pa	$F_W$ in N
3	2,23	3,00	0,02
4	3,41	7,00	0,03
5	4,82	14,00	0,06
6	7,06	30,00	0,14
7	11,16	75,00	0,37
8	13,14	104,00	0,51
9	13,46	109,00	0,54
10	13,70	113,00	0,55

Nun haben wir den Strömungswiderstand über dem Staudruck aufgetragen. Es ergab sich das folgende Schaubild:



Man erkennt sehr schön, dass stets ein linearer Zusammenhang zwischen Strömungswiderstand und Staudruck besteht, wie wir es erwartet haben:  $F_W \propto p_d$ . Da  $p_d = \frac{\rho}{2}u^2$  gilt, folgt daraus für den Zusammenhang zwischen Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit:  $F_W \propto u^2$ .

Wir haben in dieser und in Aufgabe 2.1 also experimentell bestätigt, dass  $F_W \propto u^2$  und  $F_W \propto A$  gilt. Daraus ergibt sich, dass die Formel  $F_W = c_W \cdot \frac{\rho}{2}u^2 \cdot A$  für  $c_W = const$  ebenfalls von uns experimentell als bestätigt gilt.

### Aufgabe 2.3

Ziel der nächsten Aufgabe war es, einen Zusammenhang zwischen Rücktrieb und Körperform herauszufinden. Dabei haben wir verschiedene Probekörper wie eine Kugel, eine Halbkugel und einen Stromlinienkörper in beiden Richtungen zur Strömung im Messbereich befestigt und bei konstanter Drehzahl (Potentiometerstellung wieder bei 8 Skalenteilen,  $p_d = 104,0 Pa$ ) den Strömungswiderstand  $F_W$  gemessen. Der Durchmesser  $d$  aller Probekörper war gleich mit  $d = 56 mm$ , woraus sich direkt  $A = 2,46 \cdot 10^{-3} m^2$  ergab. In nachfolgender Tabelle sind unsere Messwerte dargestellt. Wir haben dabei alle Strömungswiderstände um den Widerstand des Stiels korrigiert.

<b>d in mm</b>	56
<b>A in m<sup>2</sup></b>	2,46E-03
<b>p<sub>d</sub> in Pa</b>	104
<b>F<sub>W,Stiel</sub> in N</b>	0,03

<b>Körper</b>	<b>F<sub>W</sub> in N</b>	<b>F<sub>W,korr</sub> in N</b>	<b>c<sub>W,mess</sub></b>	<b>c<sub>W,lit</sub></b>
<b>Kugel</b>	0,12	0,09	0,35	0,45
<b>Halbkugel, Öffnung in Windrichtung</b>	0,13	0,1	0,39	0,34
<b>Halbkugel, Öffnung gegen Windrichtung</b>	0,37	0,34	1,33	1,33
<b>Stromlinienkörper, Spitze in Windrichtung</b>	0,05	0,02	0,08	k.A.
<b>Stromlinienkörper, Spitze gegen Windrichtung</b>	0,05	0,02	0,08	0,05

Die  $c_W$ -Werte errechneten sich dabei wie in der Vorbereitung gezeigt mit:

$$c_W = \frac{F_W}{p_d \cdot A}$$

Man erkennt, dass unsere errechneten Werte bis auf die Kugel sehr gut mit den Literaturwerten übereinstimmen. Für einen Stromlinienkörper mit Spitze in Windrichtung haben wir keine zuverlässigen Literaturwerte gefunden, allerdings dürfte sich der Wert nicht ändern, worauf auch unser errechnetes Ergebnis hindeutet. Wie man es intuitiv erwarten würde, findet man für den Stromlinienkörper die niedrigsten  $c_W$ -Werte, das heißt, dass ein solcher Körper das beste Verhältnis aus Strömungswiderstand und Angriffsfläche besitzt.

Mögliche Fehlerquellen waren beim Stromlinienkörper das Loch in der Spitze zur Befestigung des Körpers am Stiel sowie generell bei allen Körpern die ungenaue Aufhängung.

## Aufgabe 2.4

Als abschließende Aufgabe in diesem Versuchsblock haben wir noch die  $c_W$ -Werte zweier verschiedener Modellflugzeuge gemessen. Die Oberfläche wurde dabei von uns grob abgeschätzt und die Berechnung der Werte erfolgte analog zu Aufgabe 2.3. Wir fanden folgende Werte:

$p_d$ in Pa	104		
Körper	A in cm <sup>2</sup>	F <sub>w</sub> in N	c <sub>w</sub>
Doppeldecker	6,1875	0,08	1,24
Düsenjet	6,3	0,06	0,92

Da die Messungen durch schwierige Aufhängung sowie ungenaue Oberflächenabschätzung stark fehlerbelastet waren, sind die obigen  $c_W$ -Werte mehr symbolisch zu nehmen. Man erkennt, dass der Düsenjet durch seine windschnittigere Form einen niedrigeren  $c_W$ -Wert besitzt als der sperrige Doppeldecker. Dies deckt sich auch mit der intuitiven Einschätzung, die wir vor dem Versuch hatten, sodass wir erkannten, dass der Düsenjet energetisch günstiger fliegt als der Doppeldecker.

## Aufgabe 3: Messungen an einem Tragflügel

Bei dieser Aufgabe untersuchten wir die Wirkungsweise und den Aufbau eines Tragflügelmodells.

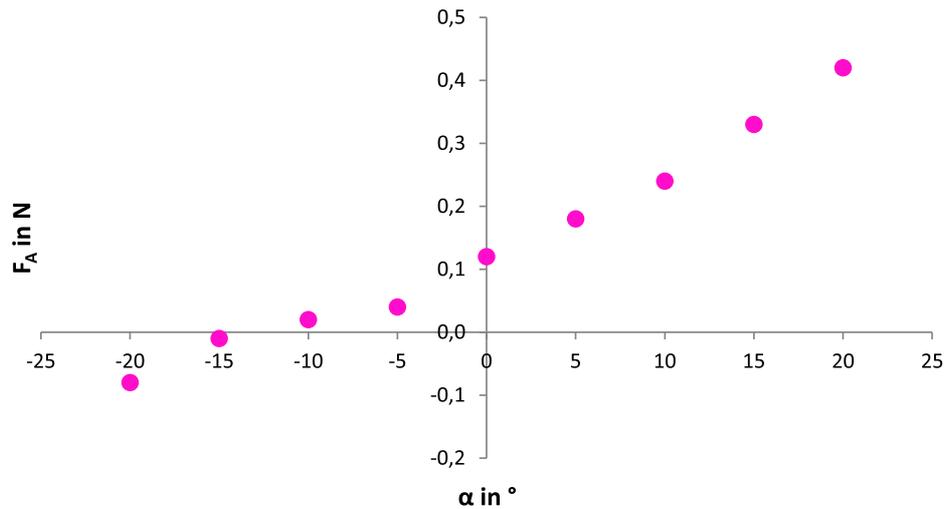
### Aufgabe 3.1

Bei konstanter Windgeschwindigkeit (8 Skt. entspricht nach Aufgabe 2.1  $p_d = 104 \text{ Pa}$ ) maßen wir bei der Modelltragfläche den Auftrieb  $F_A$  sowie den Strömungswiderstand  $F_W$ . Dabei variierten wir den Anstellwinkel  $\alpha$  in 5° Schritten zwischen  $-20^\circ$  und  $+20^\circ$ . Der Quotient aus den Messwerten ergab direkt die gesuchte Gleitzahl  $\epsilon$ .

Zunächst unsere gemessenen Werte und einige graphische Darstellungen:

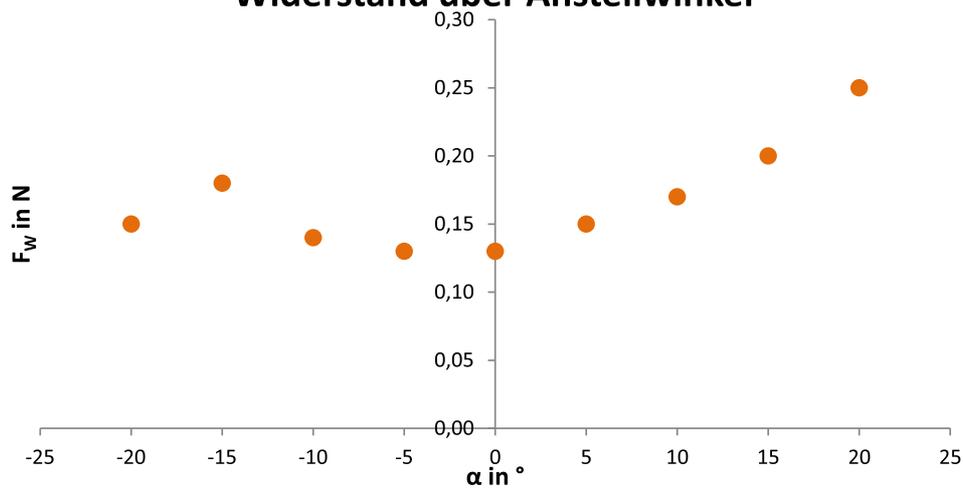
$\alpha$ in °	F <sub>A</sub> in N	F <sub>w</sub> in N	$\epsilon$
-20	-0,08	0,15	-1,88
-15	-0,01	0,18	-18,00
-10	0,02	0,14	7,00
-5	0,04	0,13	3,25
0	0,12	0,13	1,08
5	0,18	0,15	0,83
10	0,24	0,17	0,71
15	0,33	0,20	0,61
20	0,42	0,25	0,60

## Auftrieb über Anstellwinkel



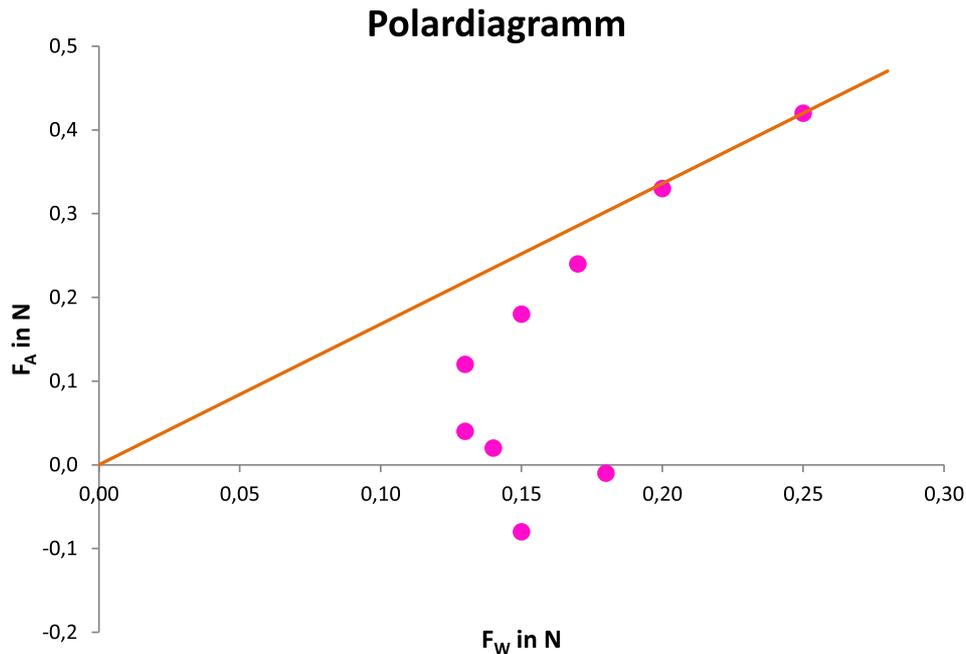
Hier lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Auftrieb und Anstellwinkel vermuten.

## Widerstand über Anstellwinkel



Der Strömungswiderstand folgt bei negativen Anstellwinkeln keinen einfachen Gesetzen, bei den positiven Winkeln lässt sich jedoch ein konstanter Anstieg des Widerstandes erkennen, der eventuell sogar exponentiell oder quadratisch verläuft. Um dies zu bestätigen wären weitere Messungen bei größeren Winkeln nötig gewesen.

Nun sollten wir die Auftriebswerte über den Strömungswiderstand auftragen, dies ergab ein sogenanntes Polardiagramm:



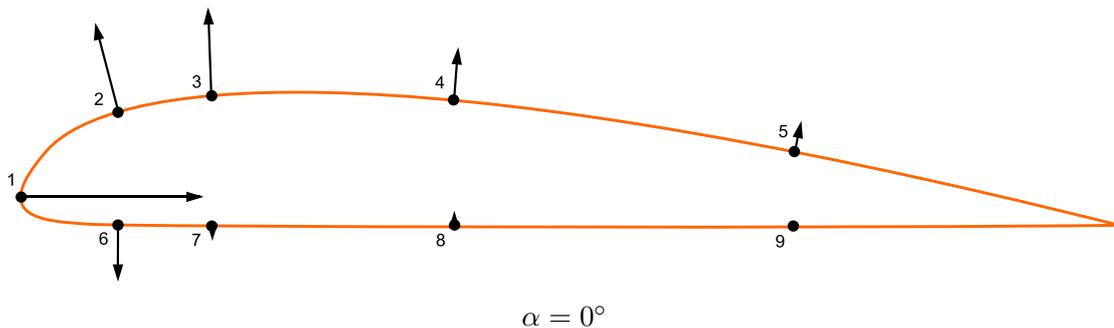
Die günstigste Gleitzahl erhält man nun, wenn man eine Gerade mit maximaler Steigung so in das Schaubild legt, dass sie einen Messwert und den Ursprung durchläuft. Dies entspricht der kleinsten positiven Gleitzahl. Diese erhalten wir bei dem Messpunkt bei  $\alpha = 20^\circ$ . Dort erhalten wir für die Gleitzahl  $\epsilon = 0,6$ . Um diese Gleitzahl zu verbessern, könnte man den Auftrieb durch eine stärkere Wölbung der Oberseite der Tragfläche erhöhen oder durch Glättung des Materials den Strömungswiderstand senken.

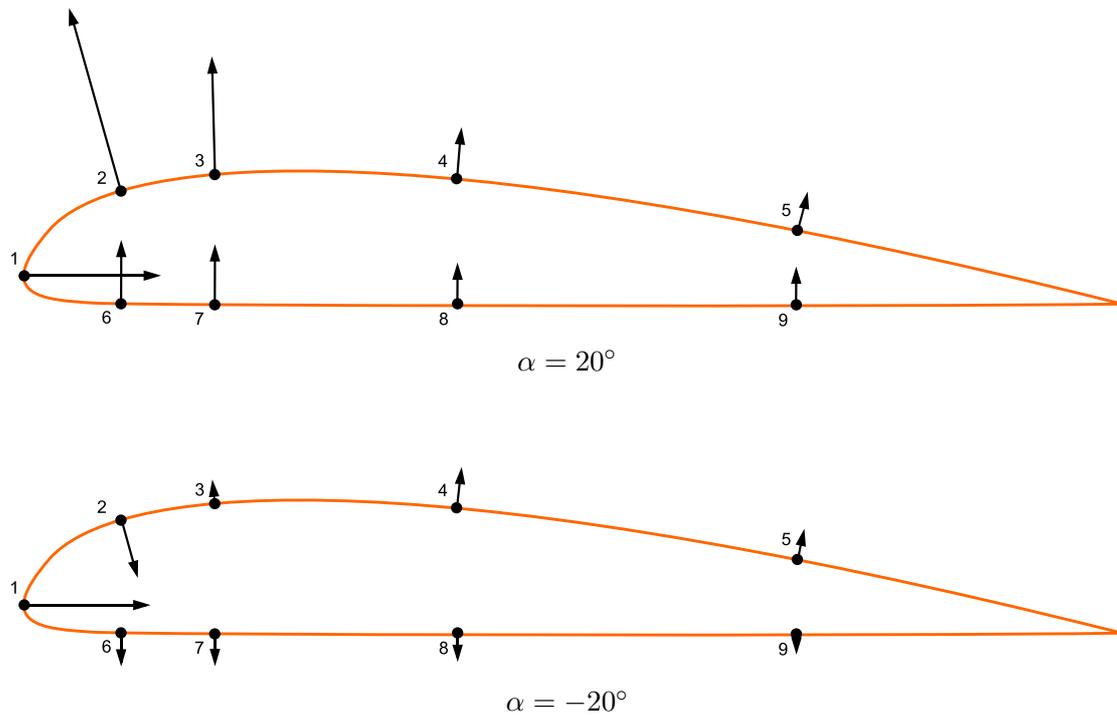
### Aufgabe 3.2

Wir haben bei konstanter Windgeschwindigkeit bei drei verschiedenen Anstellwinkeln ( $\alpha = -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ$ ) den Druck an verschiedenen Messstellen des Tragflächenmodells gemessen. Die negativen Drücke stellen einen Unterdruck an der Messstelle dar, die positiven einen Überdruck:

Loch	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\alpha$ in $^\circ$	p in Pa								
-20	65	32	-3	-14	-10	-8	-7	-6	-2
0	100	-46	-43	-21	-9	-26	-1	1	0
20	70	-104	-64	-24	-14	31	29	17	14

Diese Drücke sollten nun als "Druckvektoren" in die Querschnittskizzen eingetragen werden. Da der Druck selbst keine vektorielle Größe ist, wählen wir als Richtung die Normale auf der Oberfläche des jeweiligen Messpunktes und als Länge den gemessenen Druck.





Bei den ersten beiden Skizzen ( $\alpha = 0^\circ$  und  $20^\circ$ ) zeigen die meisten Vektoren nach oben. Schließt man dabei den Vektor des ersten Messpunktes aus, kann man über die Summe der restlichen Vektoren eine Aussage darüber machen, ob das Flugzeug steigt oder sinkt. Erhält man in der Summe einen Vektor, der nach oben zeigt, kann man dies als Auftrieb sehen. Daher ist, wie zu erwarten, bei einem Anstellwinkel von  $\alpha = -20^\circ$  Abtrieb zu erwarten, da die Summe aller Vektoren nach unten zeigt.

Damit ist nun auch die Wirkungsweise einer Tragfläche klar. Durch die Wölbung an der Oberseite legt die Luft eine längere Strecke zurück und wird daher beschleunigt. Durch das Steigen des dynamischen Drucks sinkt der statische Druck und es kommt zu einem Unterdruck oberhalb der Tragfläche. Gleichzeitig entsteht unterhalb der Tragfläche ein Überdruck. Diese Druckdifferenzen üben eine Kraft auf die Tragfläche nach oben aus und sorgen so für Auftrieb.

## Quellenverzeichnis

Literaturangaben der  $c_W$ -Werte:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Strömungswiderstandskoeffizient>