

# Protokoll zum Versuch „Aeromechanik (2)“

Kirstin Hübner      Armin Burgmeier      Gruppe 15 (P1-26)

21. Januar 2008

## D Demonstrationsversuche

Wenn wir im folgenden von „senkrecht“ bzw. „parallel“ sprechen, so ist immer die Stellung der Öffnung der Sonde zum Luftstrom gemeint.

### D1 Druckmessungen mit einer Scheibensonde

Wie erwartet misst die Scheibensonde einen höheren Druck wenn man sie parallel einbringt, da in diesem Fall der Gesamtdruck gemessen wird. Bringt man sie senkrecht zum Luftstrom ein, so misst man nur den statischen Druck, der unabhängig von der Geschwindigkeit des Luftstroms und in alle Richtungen gleich ist.

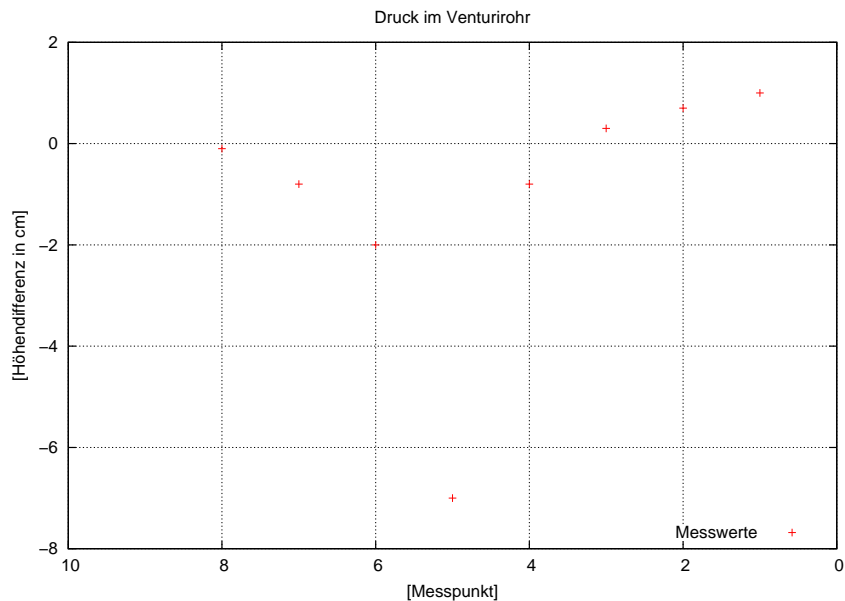
### D2 Variation der Windgeschwindigkeit und Rohrsonde

Wir haben bei drei verschiedenen Windgeschwindigkeiten mit der Scheibensonde den gesamten und den statischen Druck gemessen. Der Gesamtdruck stieg mit der Geschwindigkeit an während der statische Druck konstant blieb.

Zudem haben wir den statischen Druck mit der Rohrsonde gemessen indem wir diese senkrecht zur Strömungsrichtung eingebracht haben. Da wir mit dieser Konfiguration prinzipiell den statischen Druck messen haben wir auch hier konstante Werte erwartet. Dies war allerdings in der Realität nicht der Fall, was wahrscheinlich auf Verwirbelungen zurückzuführen ist. Bemerkenswerterweise decken sie sich aber betragsmäßig nahezu mit denen der Scheibensonde im parallelen Fall.

### D3 Venturirohr

Wir haben an acht verschiedenen Stellen, durchnummeriert von der Windmaschine weg, den statischen Druck im Venturirohr beobachtet.

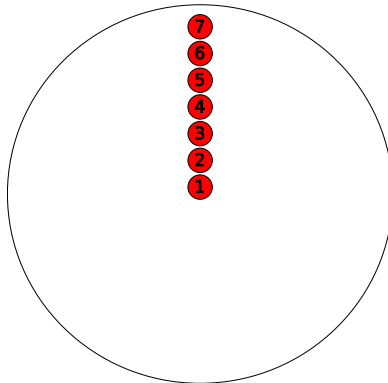


Auf den statischen Druck wurde mit Hilfe von U-Rohren, in denen eine bunte Flüssigkeit je nach Druck angesogen oder abgestoßen wurde, geschlossen. Negative Werte sind als Unterdruck zu verstehen, positiver Werte als Überdruck. Daher dürften in unserer Messung nur negative Messwerte vorkommen, da durch die Luftgeschwindigkeit im Rohr der statische Druck überall kleiner als der Normaldruck sein sollte. Die positiven Werte an den Messpunkten 1 bis 3 lassen sich durch unzureichende Anbringung der Messöffnungen erklären: Da sie nicht senkrecht zur Oberfläche des Rohres angebracht sind und zudem zu groß sind wird ein Teil des dynamischen Druck mitgemessen und es wird ein Überdruck angezeigt.

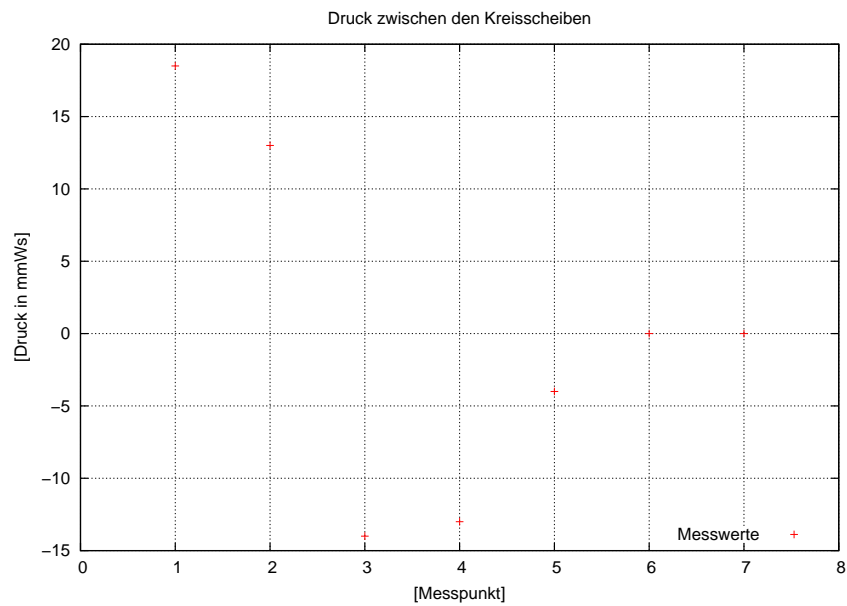
Der prinzipielle Effekt im Venturirohr war vor allem in der Mitte deutlich zu erkennen, da hier an der Stelle des kleinsten Durchmessers auch der niedrigste Druck angezeigt wurde. Allerdings hat der Wert bei diesem Messpunkt während der Messung stark geschwankt, die Tendenz war jedoch klar zu erkennen. Die Schwankung liegt möglicherweise an Verwirbelungen, da der Durchmesser in der Mitte am kleinsten ist.

#### D4 Aerodynamisches Paradoxon

Wir haben den statischen Druck an den in der Grafik gekennzeichneten Stellen zwei eng aneinanderliegenden Kreisscheiben gemessen. Der Luftstrom wurde dabei durch eine Öffnung in der Mitte in einer der Kreisscheiben eingebracht und strömte radial nach außen.



Erwartet haben wir, dass der Druck nach außen hin zunimmt, da aufgrund der Kontinuitätsgleichung die Geschwindigkeit zum Mittelpunkt hin zunimmt. Jedoch wurde an den Messpunkten 1 und 2 ein starker Überdruck festgestellt. Dieser erklärt sich durch die Anordnung dieser Punkte. Da auf sie die Luft fast senkrecht einströmt wird hier wieder ein Teil des dynamischen Drucks mitgemessen.



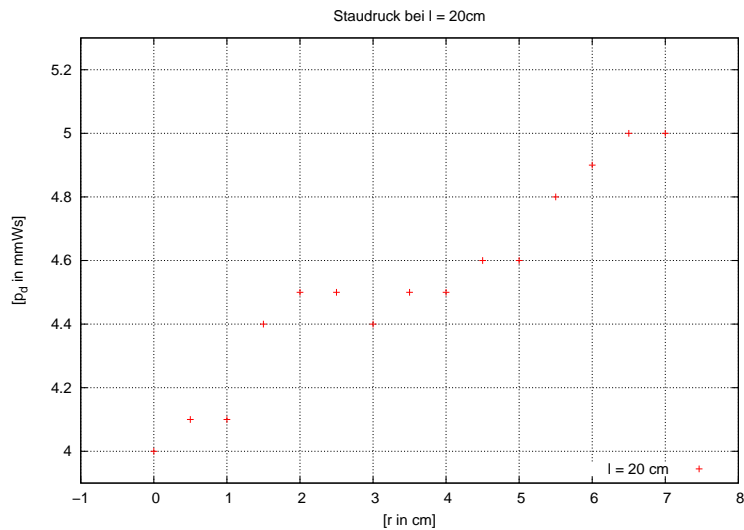
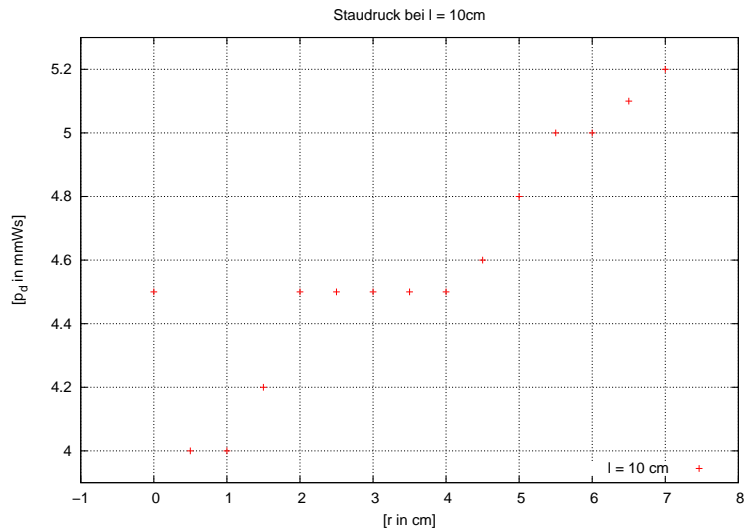
Im Schaubild gut zu erkennen ist, dass für die restlichen Messpunkte unsere Erwartungen mit dem Experiment übereinstimmen, das heißt die Scheiben werden gegeneinander gedrückt.

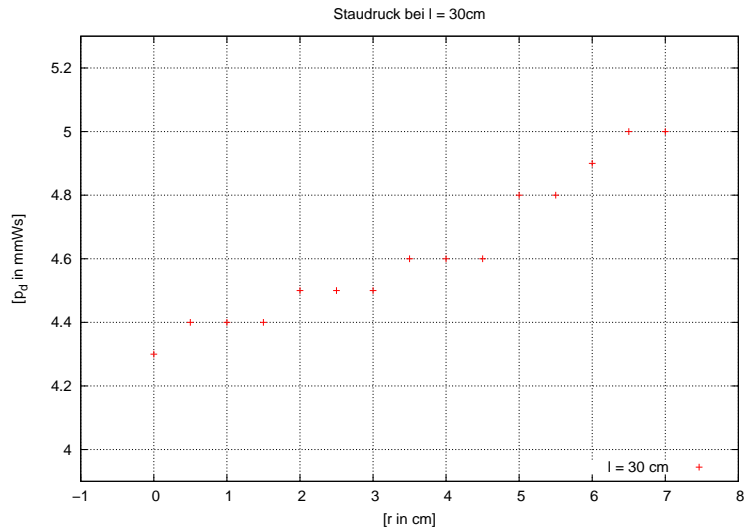
# 1 Untersuchen des Luftstroms

## 1.1 Staudruck an verschiedenen Stellen

Wir haben den Staudruck  $p_d$  an verschiedenen Orten im Luftstrom mit Hilfe des Prandtl'schen Staurohrs bei konstanter Windgeschwindigkeit gemessen um einen Ort zu finden an dem sich der Luftstrom möglichst konstant verhält. Dazu haben wir nicht nur den Abstand zur Düse sondern auch den zur Mittelachse variiert.

Im folgenden sind die Druckverläufe bei verschiedenen Abständen  $l$  von der Düse in Abhängigkeit vom Abstand zur Mittelachse  $r$  aufgetragen:





Zu beobachten ist vor allem bei  $l = 10\text{cm}$  und  $l = 20\text{cm}$ , dass im Bereich von  $r = 2\text{cm}$  bis  $r = 4\text{cm}$  der dynamische Druck nahezu konstant ist. Wir haben daher die folgenden Messungen bei  $l = 20\text{cm}$  und  $r = 3\text{cm}$  vorgenommen. Eigentlich hatten wir erwartet, dass auf der Mittelachse ein homogener Bereich zu finden ist, die Verschiebung lässt sich wahrscheinlich auf einen Fehler in der Windmaschine oder auf eine Verrückung der Maschine relativ zur festen Messkala zurückführen.

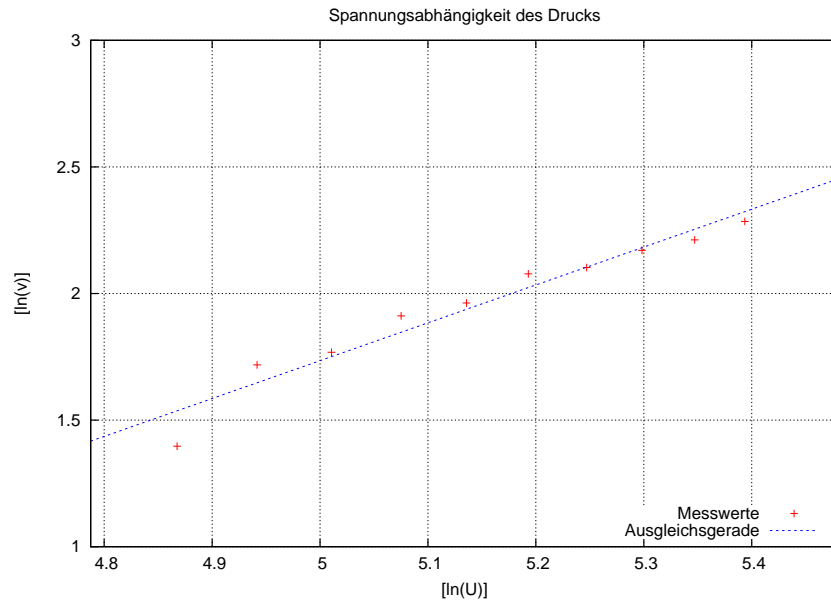
Insgesamt fällt auf, dass die Differenz zwischen den Messwerten mit steigendem Abstand von der Düse abnimmt. Dies war auch zu erwarten, da der Luftstrom am Anfang noch fokussiert ist und sich dann im Raum auffächert.

## 1.2 Spannungsabhängigkeit der Windgeschwindigkeit

Wir haben nun den Staudruck am zuvor bestimmten Ort unter Veränderung der Windgeschwindigkeit gemessen. Wie in den Vorbereitungen hergeleitet können wir den Exponenten aus  $v = k \cdot U^m$  über folgende Gerade bestimmen:

$$\ln(v) = m \ln(U) + \ln(k)$$

Dazu haben wir zunächst aus dem dynamischen Druck die Luftgeschwindigkeit bestimmt indem wir  $1\text{mmWs} = 9,81\text{Pa}$  verwendet und in die Gleichung  $v = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}}$  eingesetzt haben. Die Dichte  $\rho$  von Luft ist  $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$ .



Die Steigung ergibt sich zu  $m = 1,49557$ . Dieser Wert weicht von unserem Erwartungswert  $m = \frac{2}{3}$  stark ab. Dies ist wahrscheinlich auf Ablesefehler an der Wassersäule zurückzuführen. An den Messwerten fällt auf, dass zwischen 3 aufeinanderfolgenden Werten zwei immer weit auseinander und zwei nah beieinander liegen, wobei eher ein kontinuierlicher Übergang zu erwarten wäre. Weiter kommen natürlich auch nicht quantifizierbare Fehlerquellen wie beispielsweise Verwirbelungen oder Ungenauigkeiten in der Windmaschine in Betracht.

## 2 Rücktrieb

### 2.1 Rücktrieb und Stirnfläche

Wir haben bei konstanter Windgeschwindigkeit drei verschieden große Kreisscheiben in den Luftstrom gehalten und den Rücktrieb mit Hilfe einer Federwaage gemessen. Dazu wurden diese mittels Faden über eine Umlenkrolle mit dem hinteren Teil des Haltestils verbunden.

Fläche [cm <sup>2</sup> ]	Strömungswiderstand [mN]	Verhältnis [mN/m <sup>2</sup> ]
19,64	108	5,50
9,62	18	1,87
4,9	37	7,55

Bei den eingetragenen Widerstandswerten wurde der Widerstand des Haltestils  $F_W = 22\text{mN}$  bereits abgezogen. Zu erwarten wäre ein linearer Zusammenhang zwischen Strömungswiderstand und Fläche gewesen. Diesen konnten wir

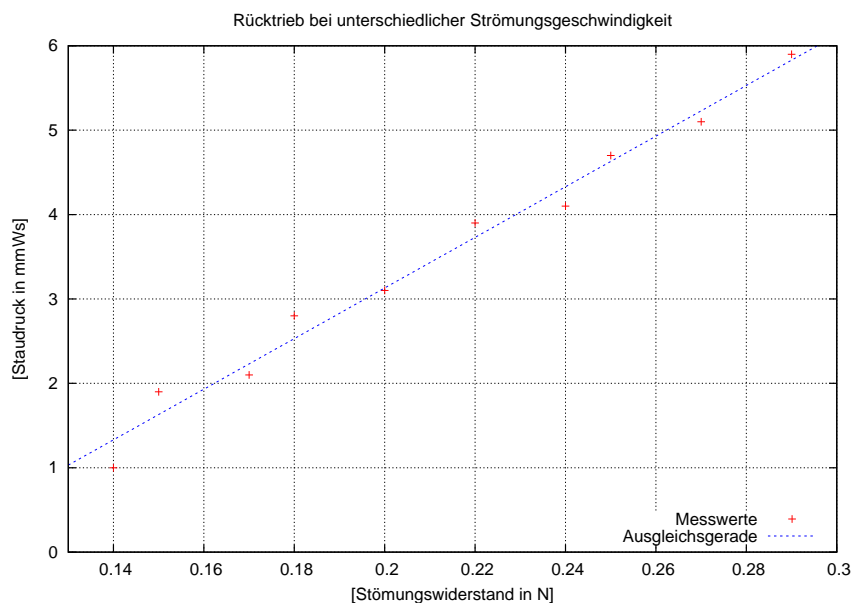
nicht bestätigen, was vermutlich auf den Versuchsaufbau zurückzuführen ist.

Reibung innerhalb der Federwaage und der Umlenkrolle sind die wahrscheinlichsten Fehlerursachen. Bei der großen Federwaage war teilweise gar kein Ausschlag festzustellen, da die Haftreibung nicht überwunden wurde. Weiter musste die Aparatur immer wieder so ausgerichtet werden, dass die Kreisscheiben senkrecht im Windstrom stehen, was auch nicht immer eindeutig zu erreichen war. Die Ablesefehler dürften gegen die systematischen Fehler zu vernachlässigen sein.

## 2.2 Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit

Nun haben wir den Rücktrieb der großen Kreisscheibe in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit gemessen. Dazu haben wir den gleichen Versuchsaufbau wie bei der vorherigen Aufgabe verwendet und die Motorspannung der Windmaschine in 10V-Schritten zwischen 130V und 220V variiert.

Im folgenden Schaubild wird der dynamische Druck über den Strömungswiderstand aufgetragen. Dabei haben wir den zur jeweiligen Spannung gehörenden Druck der Messreihe aus Aufgabe 1.2 entnommen.



Nach  $F = c_w p_d A$  erwarten wir einen linearen Zusammenhang zwischen Strömungswiderstand und dynamischem Druck. Diesen können wir in unserer Messung bestätigen. Wegen dem ähnlichen Versuchsaufbau kommen auch die gleichen Fehlerquellen wie in der vorherigen Aufgabe in Frage, jedoch haben wir nach unseren vorherigen Erfahrungen das Festhängen der Federwaage durch leichtes Antippen versucht zu vermindern.

### 2.3 Widerstandsbeiwert verschiedener Körper

In dieser Aufgabe haben wir bei konstanter Motorspannung den Strömungswiderstand rotationssymmetrischer Körper gemessen. Mit Hilfe der Querschnittsfläche und des aus Aufgabe 1.2 bekannten dynamischen Drucks können wir damit den Widerstandsbeiwert  $c_w$  der Körper bestimmen.

In folgender Tabelle haben wir bei den Strömungswiderständen die Eichung der Federwaage bereits einberechnet. Der  $c_w$ -Wert berechnet sich durch

$$c_w = \frac{F}{p_d A}$$

Körper	Strömungswiderstand [mN]	$c_w$
Kugel	30	1,33
Halbkugel (flach links)	27	1,19
Halbkugel (flach rechts)	57	2,50
Halbkörper mit Rundung (flach links)	22	0,97
Halbkörper mit Rundung (flach rechts)	49	2,17
Halbkörper mit Spitze (flach links)	18	0,80
Halbkörper mit Spitze (flach rechts)	41	1,81
Stromlinienkörper (Spitze links)	11	0,49
Stromlinienkörper (Spitze rechts)	21	0,93
Stromlinienkörper (rauh, Spitze links)	21	0,93
Stromlinienkörper (rauh, Spitze rechts)	16	0,71

Tendenziell wurden unsere Erwartungen bestätigt. Der stromlinienförmige Körper weist eindeutig den geringsten und somit besten Widerstandsbeiwert auf. Den schlechtesten Wert hat die Halbkugel wenn ihre flache Seite der Windmaschine zugewandt ist. Allgemein gilt für die Halbkörper, dass, wenn die flache Seite entgegen dem Luftstrom ausgerichtet ist, die Widerstandsbeiwerte deutlich höher sind als im gedrehten Fall. Das ist klar, da die flachen Seiten einen sehr viel höheren Luftwiderstand darstellen als eine abgerundete oder spitze Fläche.

Auffällig ist die Messung bei dem Stromlinienkörper mit angerauhter Oberfläche, da hier der Widerstandsbeiwert größer wird wenn die Spitze zum Luftstrom hin zeigt. Dies ist anders als bei dem glatten Körper und auch entgegen unserer Intuition. Verwirbelungen an der rauhen Oberfläche oder Messfehler (zum Beispiel durch die Federwaage) sind die wahrscheinlichsten Ursachen hierfür. Auch das Ausrichten der Körper senkrecht zur Strömungsrichtung birgt Fehlerquellen.



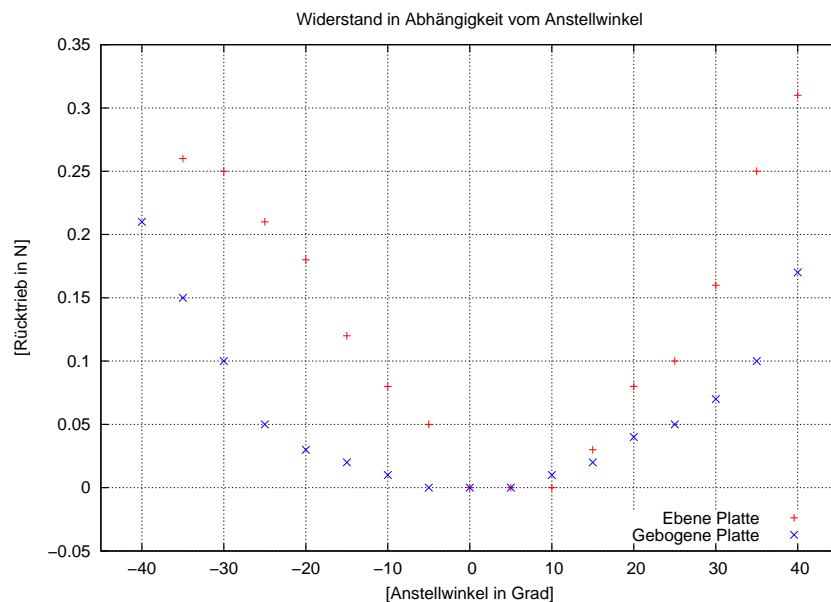
### 3 Auftrieb und Strömungswiderstand abhängig vom Anstellwinkel

#### 3.1 Untersuchung von ebener und gebogener Platte

Wir haben eine ebene und eine gebogene Platte in den Luftstrom eingebracht und sowohl Rück- als auch Auftrieb bei verschiedenen Anstellwinkeln gemessen. Den Rücktrieb haben wir mit der gleichen Messvorrichtung wie in den vorherigen Experimenten gemessen. Um den Auftrieb zu messen haben wir die Federwaage direkt an den Haltestil des Flügels angebracht. Beim Abtrieb haben wir wieder die Umlenkrolle zu Hilfe genommen.

##### 3.1.1 Strömungswiderstand

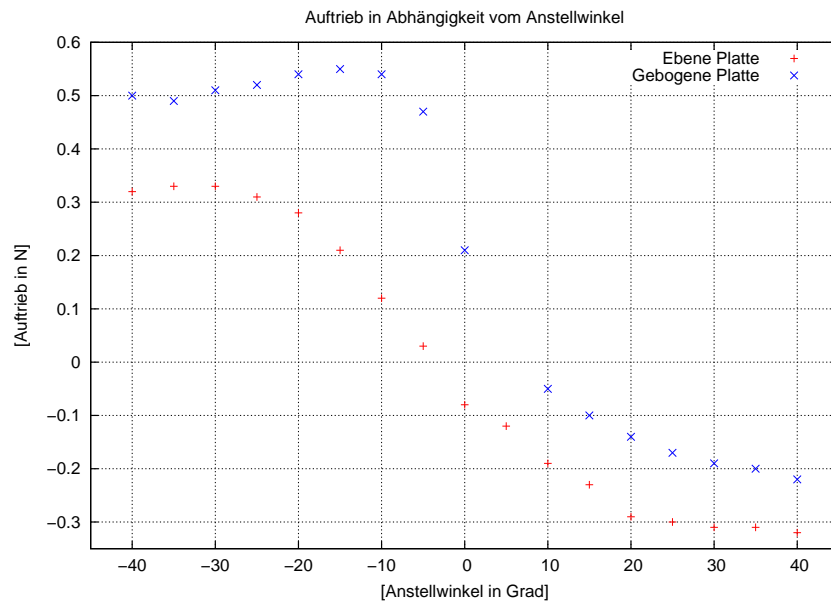
Im nachstehenden Diagramm wurde der Strömungswiderstand über dem Anstellwinkel für die ebene und die gebogene Platte aufgetragen.



Wie deutlich zu sehen ist hat die gebogene Platte stets einen kleineren Rücktrieb als die ebene Platte. Bei beiden verhält sich der Rücktrieb symmetrisch zum Winkel  $\alpha = 0^\circ$  und steigt mit größerem Anstellwinkel etwa parabelförmig an. Interessant ist, dass im Bereich von  $-5^\circ$  bis  $5^\circ$  bei beiden nahezu kein Rücktrieb auftritt.

##### 3.1.2 Auf- bzw. Abtrieb

Nun haben wir den Auftrieb der beiden Platten abhängig vom Winkel aufgetragen:

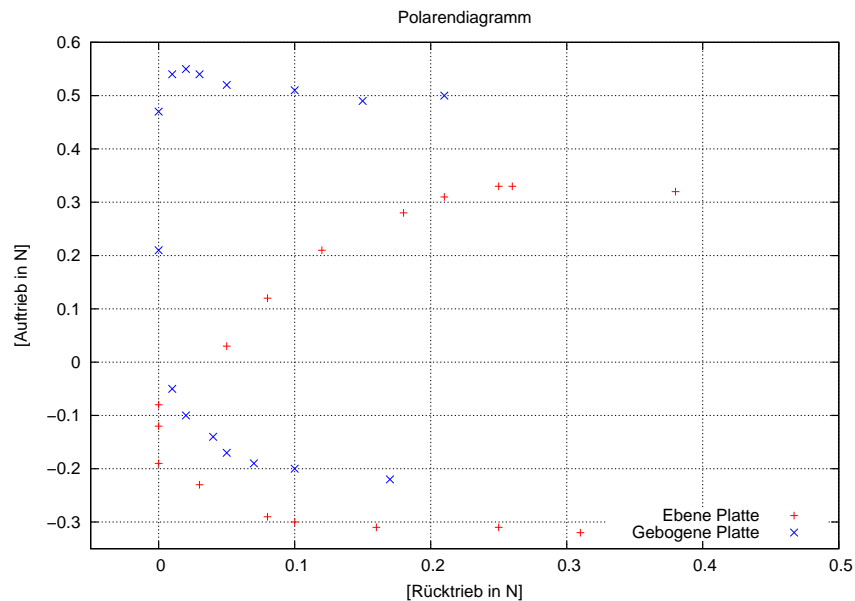


Die gebogene Platte hat wie zu erwarten war immer einen größeren Auftrieb als die ebene Platte. Die grobe Form der Kurven stimmt wieder bei beiden Platten überein. Sie sind nahezu punktsymmetrisch. Auffällig ist jedoch, dass beide Kurven für negative Winkel in einem bestimmten Bereich ein Maximum aufweisen. An dieser Stelle ist der Auftrieb am größten.

Da die gebogene Platte überall einen kleineren Rücktrieb und einen größeren Auftrieb als die ebene Platte hat, hat sie deutlich bessere Flugeigenschaften.

### 3.1.3 Polarendiagramm

Tragen wir Auftrieb über Rücktrieb auf, so erhalten wir das Polarendiagramm:



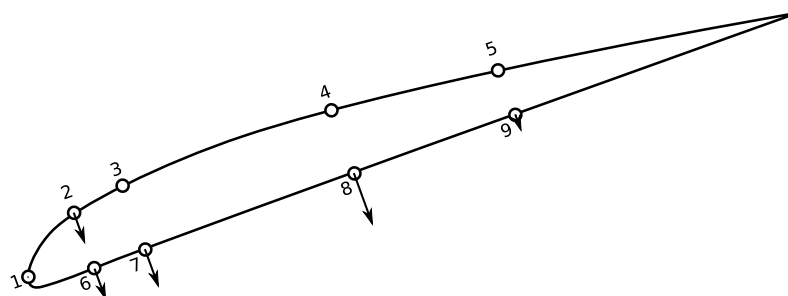
Aus diesem Diagramm können wir die Gleitzahl  $\epsilon = \frac{F_W}{F_A}$  bestimmen. Die kleinste Gleitzahl wäre in beiden Fällen bei  $\alpha = 0^\circ$ . Da der Rücktrieb hier verschwindet wird die Gleitzahl  $\epsilon = 0$ . Dies ist in der Realität nicht zu erreichen. Zu den bereits in Aufgabe 2.3 genannten Fehlerquellen kommt hier noch das Einstellen der Winkel hinzu, was sich besonders bei der gebogenen Platte als schwierig mit einem Geodreieck durchzuführen herausstellte.

Zur Verbesserung der Flugeigenschaften kann der  $c_w$ -Wert verringert werden. Zusätzlich kann die Krümmung der Platte geändert werden, sodass sich eine bessere Gleitzahl ergibt.

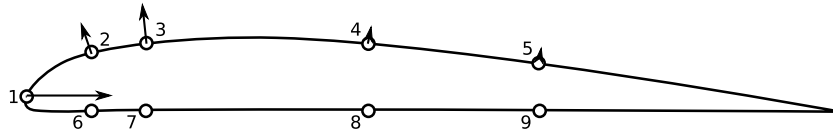
### 3.2 Druck an einer Tragfläche

Am Modell einer Tragfläche haben wir an den folgenden Stellen den statischen Druck bei verschiedenen Anstellwinkeln gemessen. Der Wind kam jeweils von links.

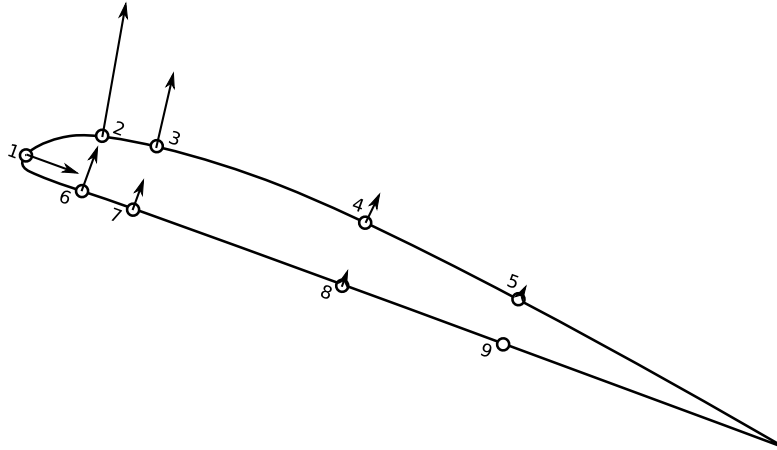
**Druckvektoren bei  $\alpha = -20^\circ$ :**



Druckvektoren bei  $\alpha = 0^\circ$ :



Druckvektoren bei  $\alpha = 20^\circ$ :



Für  $\alpha = -20^\circ$  herrscht oberhalb des Tragflügel Überdruck, und unterhalb Unterdruck, daher wirkt eine Kraft zusätzlich zur Gewichtskraft nach unten, das Flugzeug sinkt. Im Gegensatz dazu misst man bei  $\alpha = 0^\circ$  und  $\alpha = 20^\circ$  Oberhalb des Flügels einen Unterdruck. Ist die daher wirkende Kraft größer als die Gewichtskraft geht das Flugzeug in den Steigflug über.

Auffallend ist noch, dass am Messpunkt 1 stets ein Überdruck herrscht. Dieser erklärt sich durch die direkt darauf einströmende Luft. Außerdem erkennt man gut, dass die Druckvektoren nach hinten hin immer kleiner werden. Der Druckunterschied am vorderen Teil des Flügels ist größer. Dies ist durch die Auffächerung, und damit Abschwächung, des Luftstroms nach hinten hin zu erklären.

## 4 Fazit

Der Versuch Aeromechanik war für uns sehr interessant, da dieses Thema bisher weder in einer Vorlesung noch in unserer Schulzeit behandelt wurde. Zudem bot der Versuch eine Abwechslung zu den sonst recht elektrodynamiklastigen Versuchen. Die prinzipiellen Effekte wurden deutlich, auch wenn unsere Messreihen teilweise stark fehlerbelastet sind.