

Prak.: P1 Semester: WS22/23 Wochentag: Mo Gruppennr.: 06

Name: Lemmer Vorname: Timo

Name: Brodbek Vorname: Gregor

Emailadresse(n): \_\_\_\_\_

Versuch: Aeromechanik (P1-24) Fehlerrech.: Nein

Betreuerin: Juliana Braun Durchgeführt am: 21.11.22

Wird von der Betreuerin ausgefüllt.

1. Abgabe am: \_\_\_\_\_

Rückgabe am: \_\_\_\_\_ Begründung:

2. Abgabe am: \_\_\_\_\_

Ergebnis: + / 0 / - Fehlerrechnung: Ja / Nein

Datum: \_\_\_\_\_ Handzeichen: \_\_\_\_\_

Bemerkungen:

Bei diesem Versuch werden die wichtigsten Gesetzmäßigkeiten behandelt, die das Fliegen von Körpern verständlich machen, die 'schwerer als Luft' sind. Wird ein Körper von einem Medium (Flüssigkeit/Gas) umströmt, so erfährt er eine Kraft, die proportional zur Dichte  $\rho$  und zum Quadrat der Geschwindigkeit  $u$  des strömenden Mediums und proportional zur Fläche  $A$  des umströmten Körpers ist

$$F = c_w \cdot \frac{\rho}{2} u^2 \cdot A .$$

$c_w$  nennt man den Widerstandsbeiwert. Unter der Voraussetzung der Inkompressibilität des Mediums gilt die Kontinuitätsgleichung

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

In einem engeren Querschnitt ist also die Geschwindigkeit des Mediums größer, d.h. es hat eine Beschleunigung erfahren, die durch eine Krafteinwirkung verursacht wird. Bei strömenden Flüssigkeiten / Gasen entstehen Kraftwirkungen durch Druckgefälle. Am Ort größerer Geschwindigkeit muss demnach ein niedrigerer Druck herrschen. Dieser Zusammenhang wird durch die *Bernoullische Gleichung* beschrieben:

$$\begin{array}{ccccc} p & + & \frac{\rho}{2} u^2 & = & p_0 \\ \text{statischer Druck} & & \text{dynamischer} & & \text{Gesamtdruck} \\ & & \text{bzw. Staudruck} & & \end{array}$$

### Aufgaben:

Die zunächst folgenden Demonstrationsversuche dienen dem Verständnis des Druck-Geschwindigkeits-Gesetzes sowie der verwendeten Messmethoden. Da das Material hierfür nur einmal vorhanden ist, führen Sie die Versuche gemeinsam mit den anderen Gruppen durch.

**D.1.** Halten Sie eine Rohrsonde parallel zur Strömungsrichtung in den Luftstrom und beobachten Sie die Feinmanometeranzeige bei den Motordrehzahlen 2600 U/min und 1600 U/min. Drehen Sie jetzt die Rohrsonde so, dass sie senkrecht zur Strömungsrichtung steht. Was beobachten Sie am Manometer?

Verwenden Sie jetzt die Scheibensonde: richten Sie deren Rohr wie oben parallel und senkrecht zur Strömungsrichtung aus. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem der Rohrsonde. Diskutieren Sie, welchen Druck Sie mit welcher Methode gemessen haben, schließen Sie daraus auf geeignete Messmethoden für statischen Druck, Gesamtdruck sowie dynamischen Druck. (18cm-Düse, Scheibensonde, Rohrsonde, Feinmanometer)

**D.2.** Messen und skizzieren Sie den Verlauf des statischen Drucks und beobachten Sie den Gesamtdruck längs der Strömung im Venturirohr. Vergleichen Sie mit ihren Erwartungen. (Sie müssen aufgrund der Geometrie beim Messen mit Abweichungen von der Theorie rechnen.) Den Luftstrom bitte vorsichtig hochregeln. (10cm-Venturidüse mit U-Rohr-Manometern, Rohrsonde mit Verlängerung, Feinmanometer)

**D.3.** Aerodynamisches Paradoxon: Lassen Sie Druckluft axial zentrisch zwischen zwei eng aneinanderliegenden Kreisscheiben einströmen so dass sie radial nach außen entweicht. Erklären Sie das Ergebnis. (Druckluft aus der Hausversorgung)

**Aufgabe 1: Messaufbau:** Düse 10cm  $\varnothing$ , Laufstrecke, Messwagen, Prandtl'sches Staurohr, Feinmanometer.

**1.1.** Messen Sie den Staudruck  $p_d$  (dynamischer Druck) an verschiedenen Orten im Luftstrom. Überzeugen Sie sich, dass die Windgeschwindigkeit für die folgenden Versuche ausreichend ortsunabhängig ist. Geben Sie die Grenzen dafür an und legen Sie den Ort für die umströmten Körper für die folgenden Versuche fest. Stellen Sie den Verlauf des Staudrucks graphisch dar. ( $l = 10, 20, 30, 35$ cm vom Düsenrand;  $\Delta r = 1.0$ cm;  $0 \leq r \leq 5$ cm; Drehzahl: 2600 U/min)

**1.2.** Für einige der folgenden Aufgaben ist es notwendig, die Windgeschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Drehzahl ( $> 600$  U/min) zu kennen. Messen Sie diese am vorher festgelegten Ort.

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

**2.1.** Rücktrieb und Stirnfläche: Messen Sie bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit (2600 U/min) 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 (Drehzahlen wie 1.2).

**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  $8 \times 10$  cm<sup>2</sup> 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 (2600 U/min) den Auftrieb und den Strömungswiderstand in Abhängigkeit vom Anstellwinkel  $\alpha$  ( $\Delta\alpha = 5^\circ$ ;  $-20^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ ). Tragen Sie den Widerstand sowie den Auftrieb über dem Anstellwinkel auf und außerdem die Auftriebswerte über dem Widerstand (Polarendiagramm). Bestimmen Sie die günstigste Gleitzahl als reziproke Steigung aus dem Polarendiagramm. Welcher Gleitwinkel ergibt sich daraus? 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  $\sim 2800$  U/min, Einlaufzeit Motor ca. 2 min., Einstellzeit bei Drehzahländerung ca. 20 sec.

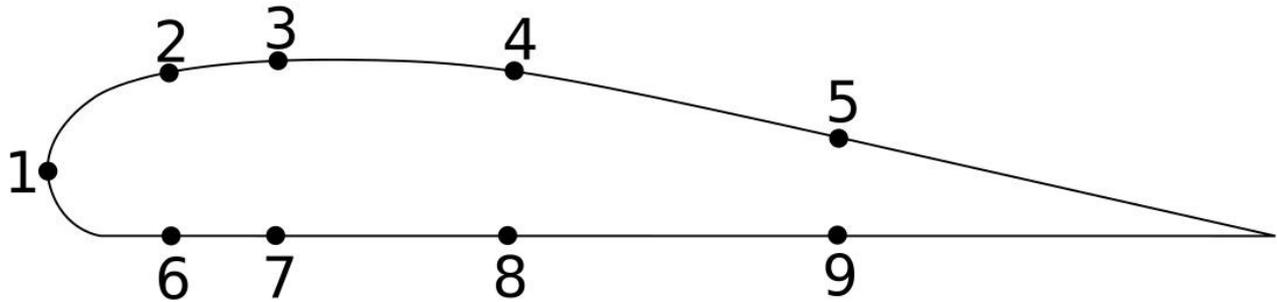
Düse zum Aufstecken ( $\varnothing 100$  mm) mit anschraubbarer Messstrecke (Länge 500 mm) für passenden Messwagen

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

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).



**Abb. 1:** Lage und Bezeichnung der Druckmessstellen

# Inhaltsverzeichnis

<b>Grundbegriffe Fluiddynamik</b>	<b>1</b>
Strömungswiderstand . . . . .	1
Kontinuitätsgleichung . . . . .	1
Bernoulli Gleichung . . . . .	2
<b>Demonstrationsversuche</b>	<b>3</b>
0.1 Druckmessung mit verschiedenen Sonden . . . . .	3
0.1.1 Rohrsonde . . . . .	4
0.1.2 Scheibensonde . . . . .	4
0.2 Venturi-Rohr . . . . .	5
0.3 Aeromechanisches Paradoxon . . . . .	6
<b>1 Prandtlisches Staurohr</b>	<b>7</b>
1.1 Staudruck an verschiedenen Orten im Luftstrom . . . . .	8
1.2 Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Drehzahl . . . . .	9
<b>2 Strömungswiderstand</b>	<b>10</b>
2.1 Rücktrieb und Stirnfläche . . . . .	10
2.2 Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit . . . . .	11
2.3 Rücktrieb und Körperform . . . . .	12
2.4 $c_w$ -Wert eines Modellautos . . . . .	13
<b>3 Tragflügel</b>	<b>15</b>
3.1 Auftrieb und Strömungswiderstand . . . . .	15
3.2 Druckmessung . . . . .	18
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>20</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	Statische Druckmessung mit der Rohrsonde . . . . .	4
2	Druckmessung mit der Scheibensonde . . . . .	4
3	Druckdifferenzen im Venturi-Rohr . . . . .	5
1.1	Verlauf des dynamischen Drucks in Abhängigkeit des Abstands . . . . .	8
1.2	Dynamischer Druck in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit . . . . .	9
2.1	Fit über die Widerstandskraft in Abhängigkeit des Durchmessers der Kreisscheiben . . . . .	10
2.2	Widerstandskraft in Abhängigkeit des Staudrucks bei zwei verschiedenen Kreisscheiben . . . . .	11
2.3	Die genutzten rotationssymmetrischen Körper . . . . .	12
2.4	Das genutzte Modellauto . . . . .	14
2.5	CAD-Modell des Modellautos . . . . .	14
3.1	Widerstands- und Auftriebskraft in Abhängigkeit des Anstellwinkels mit zugehörigen Fits . . . . .	16
3.2	Polarendiagramm der Auftriebskraft über der Widerstandskraft . . . . .	17
3.3	Druckmesspunkte am Tragflügel bei $\gamma=20^\circ$ . . . . .	18
3.4	Druckmesspunkte am Tragflügel bei $\gamma=0^\circ$ . . . . .	18
3.5	Druckmesspunkte am Tragflügel bei $\gamma=-20^\circ$ . . . . .	18

# Tabellenverzeichnis

1	Druckmessung mit Rohr- und Scheibensonde . . . . .	3
1.1	Druck in Abhängigkeit der Position im Luftstrom . . . . .	8
1.2	Druck in Abhängigkeit der Drehzahl . . . . .	9
2.1	Widerstandskraft in Abhängigkeit des Durchmessers der Kreisscheiben . . . . .	11
2.2	Widerstandskraft der rotationssymmetrischen Körper . . . . .	13
2.3	Widerstandsbeiwerte $c_w$ der rotationssymmetrischen Körper . . . . .	13
3.1	Gleitzahl $\epsilon$ in Winkelabhängigkeit . . . . .	15
3.2	Druck an den verschiedenen Messlöchern in Winkelabhängigkeit . . . . .	19
3.3	Drucksummen für verschiedene Anstellwinkel . . . . .	19

# Grundbegriffe Fluiddynamik

## Strömungswiderstand

Auf Körper, die in einem Medium eine Relativgeschwindigkeit besitzen, wirkt eine Reibungskraft. Dabei ist nur die relative Bewegung entscheidend, nicht aber, ob sich der Körper durch das Medium bewegt oder von dem Medium umströmt wird. Das im Folgenden betrachtete Medium sei ein Fluid. Hierbei entspricht die aufgebrachte Beschleunigungsarbeit der kinetischen Energie, also

$$W_{bes} = E_{kin}.$$

Die in der Formel der kinetischen Energie enthaltene Masse  $m$  des Fluids lässt sich über das Produkt aus Dichte  $\rho$  und Volumen  $A \cdot l$  umschreiben. In einer letzten Überlegung muss beachtet werden, dass die Relativgeschwindigkeit des Körpers im Fluid allgemein nur für ebene Körper gilt. Die Form des Körpers wird in einem Vorfaktor, dem sogenannten Widerstandsbeiwert  $c_w$ , berücksichtigt. Insgesamt erhält man durch einsetzen und umformen die Gleichung

$$F_w = c_w \frac{\rho}{2} u^2 A \quad (0.1)$$

für die Widerstandskraft auf einen Körper mit Relativgeschwindigkeit  $u$  in einem Fluid.

## Kontinuitätsgleichung

Ein Materiestrom in einer Stromröhre mit konstanter Geschwindigkeit  $v$  wird im Allgemeinen als stationäre Strömung bezeichnet. Die in einer solchen Röhre existierende Massenerhaltung kann genutzt werden, um den Massenstrom

$$\dot{m} = \rho v A$$

zu definieren. In einem nächsten Schritt wird das Fluid als inkompressibel angenommen. Physikalisch bedeutet dies, dass die Dichte an Messpunkt 1 die selbe wie die an Messpunkt 2 in der Röhre ist, also  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ . Durch diese Annahme kann nun ein Ausdruck für den Volumenstrom

$$\dot{V} = v \cdot A$$

hergeleitet werden. In einem letzten Schritt kann nun eine allgemeine Gesetzmäßigkeit für stationäre Strömungen in inkompressiblen Fluiden formuliert werden, die sogenannte Kontinuitätsgleichung

$$A_1 v_1 \rho = A_2 v_2 \rho, \quad (0.2)$$

wobei beachtet wurde, dass durch die konstante Dichte  $\rho$  und die Massenerhaltung der Volumenstrom konstant ist.

## Bernoulli Gleichung

Betrachtete stationäre Strömungen in inkompressiblen Fluiden weisen im Allgemeinen Energieerhaltung auf. Zur Veranschaulichung kann wieder eine Stromröhre herangezogen werden. Die Arbeitsbilanz  $\Delta W$  ergibt sich durch die an dem Fluid verrichtete Arbeit in Messpunkt 1, um das Fluid in Bewegung zu bringen, und die vom Fluid verrichtete Arbeit an Messpunkt 2 entgegen der verursachten Bewegung. Die Änderung  $\Delta E$  der Gesamtenergie ist betraglich gleich mit der Arbeitsbilanz  $\Delta W$ , die verrichtete Arbeit entspricht also der dem Fluid zugeführten Energie. Zusammenführen der beiden Ausdrücke führt auf die sogenannte Bernoulli-Gleichung

$$\rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 + p = \text{const.}$$

Hierbei ist der erste Summand auf der linken Seite der Schweredruck, der Zweite die kinetische Energiedichte und der Dritte der thermodynamische (hier: statische) Druck.

Im Folgenden wird der Schweredruck vernachlässigt, da keine Schräglagen beobachtet werden. Durch Wegfallen dieses Summanden vereinfacht sich die obige Gleichung zur Bernoulli-Gleichung:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_0, \quad (0.3)$$

wobei  $p$  der statische Druck ist, der zweite Summand der linken Seite dem dynamischen Druck entspricht und  $p_0$  den Gesamtdruck bildet, der in einer Stromröhre konstant ist.

# Demonstrationsversuche

## 0.1 Druckmessung mit verschiedenen Sonden

Es wird eine Messsonde parallel und im Anschluss senkrecht zur Strömungsrichtung in den Luftstrom gehalten. Dann wird bei einer Motordrehzahl von

$$f_{rot} = 2600 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$

das Manometer (Druckmessgerät) betrachtet. Die verwendeten Messgeräte sind eine Winddüse, eine Scheiben- und Rohrsonde und ein Feinmanometer. Hierbei kann die Windgeschwindigkeit über die Spannung  $U$  des Motors reguliert werden. Für eine ideale Druckmessung soll zur Messung des statischen Drucks die Scheibensonde parallel in den Stromkanal gehalten werden. Die Röhrenausrichtung spielt bei der Messung des Gesamtdrucks keine Rolle, da bei einer realen Messung beide Drucke gemessen werden.

**Tabelle 1:** Druckmessung mit Rohr- und Scheibensonde

Messsonde	Druck in Pa
Scheibensonde	93
Scheibensonde⊥	13
Rohrsonde	95
Rohrsonde⊥	63

### 0.1.1 Rohrsonde

Zuerst wird die Rohrsonde zur Druckmessung senkrecht zur Stromrichtung verwendet. Dabei ist zu beobachten, dass der hier gemessene statische Druck eine hohe Abweichung zur Messung mit der Scheibensonde aufweist. Diese Abweichung ist Luftverwirbelungen an der Öffnung der Sonde geschuldet. Anschließend wird die Rohrsonde parallel in den Luftstrom gehalten.

### 0.1.2 Scheibensonde

Bei der Senkrechtmessung mithilfe der Scheibensonde ist eine präzise Messung des statischen Drucks (verglichen mit der Rohrsonde) zu erwarten. Bei der im Anschluss erfolgten Parallelmessung ist ein deutlich erhöhter Druck im Vergleich zur vorherigen Messung zu beobachten, da nun der Gesamtdruck des Systems gemessen wird. Die um das Offset von 22 Pa korrigierten Werte der verschiedenen Messmethoden sind in Tabelle 1 eingetragen.



Abbildung 1: Statische Druckmessung mit der Rohrsonde



Abbildung 2: Druckmessung mit der Scheibensonde

## 0.2 Venturi-Rohr

Das Venturi-Rohr ist ein Gerät zur experimentellen Bestimmung der Fließgeschwindigkeit eines Fluids. Es beruht auf dem Prinzip der Druckänderung an einer Engstelle in einer Röhre. Die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids erhöht sich an der Engstelle, während der statische Druck abfällt. Die entstehende Druckdifferenz zwischen Messpunkt 1 vor der Verengung und Messpunkt 2 in der Verengung wird mithilfe von Abnahmeröhrchen visuell sichtbar gemacht. Es wird erwartet, dass die Flüssigkeit in den Röhrchen höher steigt, je stärker sich das Venturi-Rohr verengt.

Zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit muss die Kontinuitätsgleichung 0.2 nach der Geschwindigkeit  $v_2$  umgestellt werden, wodurch sich der Zusammenhang

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} \cdot v_1$$

zwischen den beiden Geschwindigkeiten ergibt. Einsetzen dieses Ausdrucks in die Bernoulli Gleichung für das Venturi-Rohr

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2$$

liefert nun eine Gleichung, die nur von einer unbekanntem Größe, der gesuchten Geschwindigkeit  $v_1$ , abhängt. Umstellen und verwenden des Zusammenhangs  $\Delta p := p_1 - p_2$  liefert den Term

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \left[ \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]}} \quad (0.4)$$

für die unbekanntem Geschwindigkeit  $v_1$ . Bei kleinerer Fläche A wird die Geschwindigkeit  $v_1$  größer, wodurch nach der Bernoulli-Gleichung 0.3 der dynamische Druck größer und resultierend der Statische kleiner wird, um die Konstanz zu wahren.

Es wird beobachtet, dass die Flüssigkeit in dem mittleren Röhrchen stark ansteigt, während bei den Röhrchen am Rohreingang kaum ein Effekt zu sehen ist. Nur in dem Röhrchen hinter dem Mittleren ist noch ein leichter Anstieg zu erkennen. Die fehlenden Anstiege in den vorderen Röhrchen können mit Verwirbelungen der Luft durch den zweimal um fast 90° gebogenen Schlauch begründet werden, der für die Luftzufuhr des Venturi-Rohrs verantwortlich ist.



Abbildung 3: Druckdifferenzen im Venturi-Rohr

### 0.3 Aeromechanisches Paradoxon

Über eine Zuführung wird Druckluft zwischen zwei Kreisscheiben einströmen gelassen, die dann radial nach außen strömt. Die Druckmessung wird ebenfalls radial durchgeführt.

Es wird beobachtet, dass die Scheiben zusammengepresst werden. Grund dafür ist, dass der dynamische Druck nach außen hin abfällt, während der Statische nach der Bernoulli-Gleichung 0.3 zunimmt. Zwischen den beiden Kreisscheiben entsteht ein Unterdruck durch die Differenz des höheren statischen Drucks der Umgebung und des sehr geringen statischen Drucks zwischen den Scheiben, der dafür sorgt, dass bei hohen Windgeschwindigkeiten die beiden Scheiben zusammengepresst werden.

# 1. Prandtl'sches Staurohr

Mithilfe des Prandtl'schen Rohrs soll die Windgeschwindigkeit der im Praktikum verwendeten 10 cm-Düse bestimmt werden. Das Funktionsprinzip des Prandtl-Rohrs ist, dass an zwei Stellen in einem Medium eine Druckmessung stattfindet. Die erste Öffnung des Rohrs wird parallel zur Fließrichtung in das Medium gehalten, wodurch das Medium mit der Geschwindigkeit  $v_1$  in die Röhre strömen und insgesamt der statische und Staudruck  $p_0$  gemessen werden kann. Die zweite Öffnung des Rohrs wird senkrecht zur Fließrichtung in das Medium gehalten, sodass die Fließgeschwindigkeit  $v_2$  an der Öffnung näherungsweise null ergibt. Somit wird an dieser Öffnung nur der statische Druck  $p$  gemessen.

Zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit des Mediums wird die Bernoulli-Gleichung 0.3 verwendet. Einsetzen der bekannten Zusammenhänge liefert

$$p + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_0 .$$

Umstellen und verwenden, dass der dynamische Druck gemessen am Prandtl'schen Staurohr  $\Delta p := p_0 - p$  ist, ergibt für die Geschwindigkeit  $v_1$  den Ausdruck

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} . \tag{1.1}$$

Gemessen wird im Praktikum bei  $2600 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  in den Abständen  $l$  von 10 cm bis 30 cm in 10 cm-Schritten für verschiedene Radien  $r$  ( $\Delta r = 1 \text{ cm}$ ;  $0 \text{ cm} \leq r \leq 5 \text{ cm}$ ). Anschließend wird Rücksprache mit der Betreuerin gehalten und sich für einen festen Ort und Radius für die weiteren Messungen entschieden.

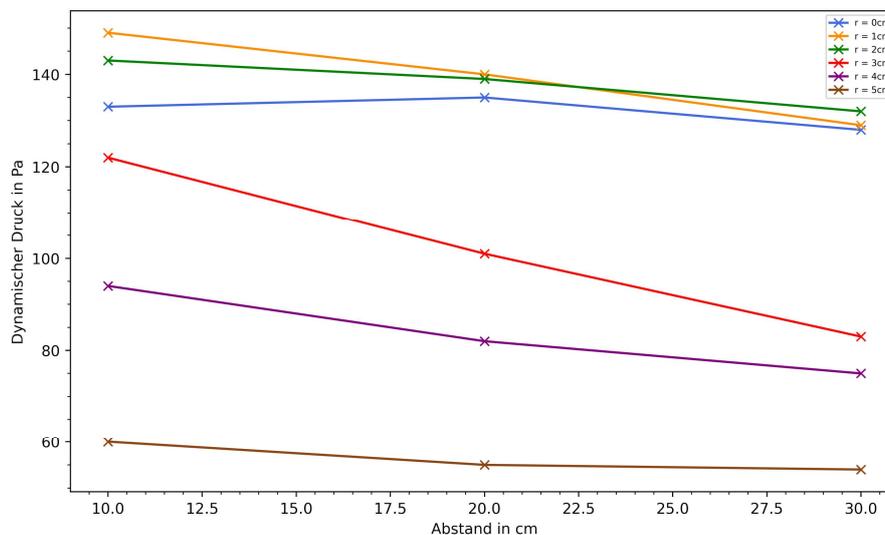
## 1.1 Staudruck an verschiedenen Orten im Luftstrom

In einem ersten Versuch wird der Staudruck (dynamischer Druck) in einem Luftstrom an verschiedenen Orten gemessen. Genutzt wird dafür ein Prandtl'sches Staurohr, welches an einem beweglichen Wagen festgemacht wird. Durch Bewegen des Wagens wird die Entfernung des Staurohrs vom Winderzeuger verändert und in verschiedenen Abständen  $l$  der Druck gemessen. Der Radius, bei dem gemessen wird, wird ebenfalls um jeweils 1 cm variiert (Durchmesser der Düse: 10 cm). Die Messungen werden bei einer Drehzahl von  $(2600 \pm 20) \frac{U}{\text{min}}$  mit einem Feinmanometer durchgeführt, welches einen Offset von 22 Pa hat. Alle Messwerte des Feinmanometers werden um dieses Offset korrigiert. Die korrigierten Werte sind in der Tabelle 1.1 dargestellt und in Plot 1.1 farblich codiert geplottet.

Nach Rücksprache mit der Betreuerin wird aufgrund dieser Messergebnisse der Ort für die weiteren Messungen auf  $l_2 = 20 \text{ cm}$  und  $r = 0 \text{ cm}$  festgelegt.

**Tabelle 1.1:** Druck in Abhängigkeit der Position im Luftstrom

Radius in cm	Druck in Pa		
	$l_1 = 10 \text{ cm}$	$l_2 = 20 \text{ cm}$	$l_3 = 30 \text{ cm}$
0	133	135	128
1	149	140	129
2	143	139	132
3	122	101	83
4	94	82	75
5	60	55	54



**Abbildung 1.1:** Verlauf des dynamischen Drucks in Abhängigkeit des Abstands

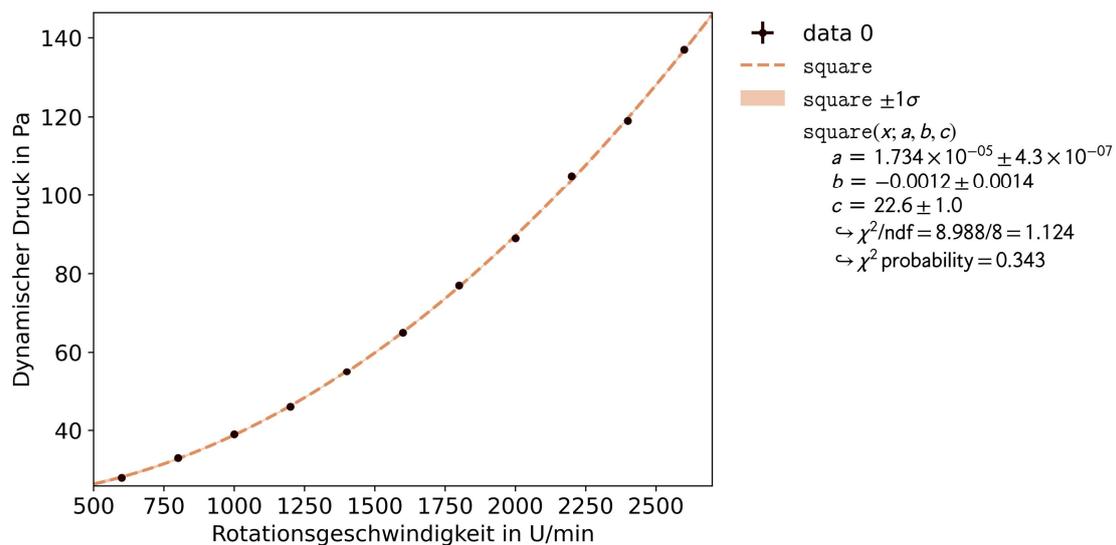
## 1.2 Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Drehzahl

Mit den festgelegten Werten kann nun eine Messreihe zur Bestimmung der Abhängigkeit zwischen Umdrehungszahl der Winddüse und Druck durchgeführt werden. Hierbei wird die Drehfrequenz  $f_{rot}$  der Düse für verschiedene Werte  $f_{rot}(\Delta f_{rot}=200 \frac{U}{min}; 600 \frac{U}{min} \leq f_{rot} \leq 2600 \frac{U}{min})$  angepasst und der jeweilige eingestellte Druck gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1.2 dargestellt.

Durch ein Fit lässt sich gut die quadratische Abhängigkeit des Staudrucks von der Rotationsgeschwindigkeit des Winderzeugers zeigen.

**Tabelle 1.2:** Druck in Abhängigkeit der Drehzahl

Drehzahl in $\frac{U}{min}$	Druck in Pa
600	28
800	33
1000	39
1200	46
1400	55
1600	65
1800	77
2000	89
2200	105
2400	119
2600	137



**Abbildung 1.2:** Dynamischer Druck in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit

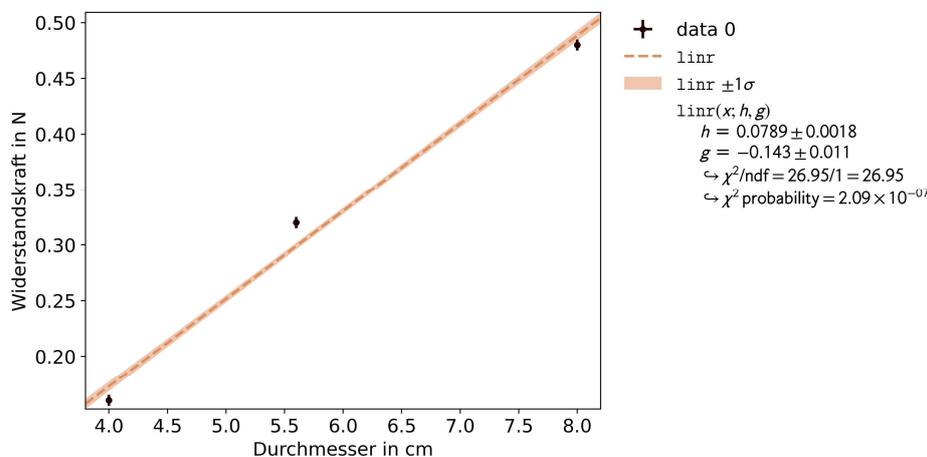
## 2. Strömungswiderstand

### 2.1 Rücktrieb und Stirnfläche

In diesem Aufgabenteil wird der Rücktrieb in Abhängigkeit der gegebenen Stirnflächen betrachtet. Dafür werden drei Kreisscheiben mit unterschiedlichem Durchmesser bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit ( $2600 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ ) in den Windkanal gehalten und die Rücktriebskraft über ein Sektorkraftmesser gemessen. Eine Vormessung ohne Kreisscheiben, also nur des Haltestiels, liefert einen Wert für das Offset. Die erhaltenen Werte für die Kraft können nun mithilfe von Gleichung 0.1 ins Verhältnis zu den Maßen der Stirnfläche gesetzt werden. Durch die Gleichung angegeben ist ein proportionales Verhältnis zwischen Gegenstandsoberfläche und Kraft zu erwarten.

Um den Strömungswiderstand  $F_w$  zu messen werden die Kreisscheiben unter dem beweglichen Wagen festgemacht. Es werden drei verschiedene Kreisscheiben mit den Durchmessern  $d = [4 \text{ cm}, 5,6 \text{ cm}, 8 \text{ cm}]$  verwendet. Dann wird der Wagen an einen Sektor-Kraftmesser mit einer Skala von 0 N bis 6 N angeschlossen, der die Kraft, mit der der Wagen vom Luftstrom weggedrückt wird, anzeigt. Es wird wieder am festgelegten Ort gemessen. Ohne Kreisfläche konnte kein Offset, der nur durch die Halterung verursacht worden wäre, festgestellt werden.

In Tabelle 2.1 und in Plot 2.1 ist zu erkennen, dass - wie bereits erwartet - ein linearer Zusammenhang zwischen Gegenstandsoberfläche und Widerstandskraft besteht.



**Abbildung 2.1:** Fit über die Widerstandskraft in Abhängigkeit des Durchmessers der Kreisscheiben

**Tabelle 2.1:** Widerstandskraft in Abhängigkeit des Durchmessers der Kreisscheiben

Durchmesser in cm	Strömungswiderstand $F_w$ in N
4	0,16
5,6	0,32
8	0,48

## 2.2 Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit

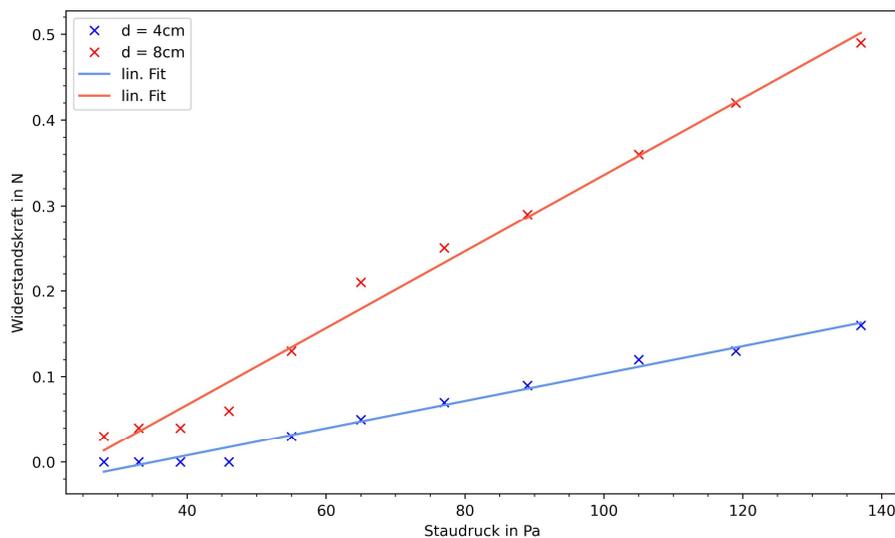
In einer zweiten Versuchsreihe sollen nur noch zwei Körper betrachtet werden. Es wird sich zur Verdeutlichung für die kleinste und die größte Kreisscheibe entschieden. Wie im Versuch zuvor wird wieder die Rücktriebskraft gemessen, wobei dieses Mal der Fokus auf der Veränderung der Windgeschwindigkeit (und damit korreliert des Staudrucks  $p_d$ ) liegen soll. Umformen von Gleichung 0.1 mithilfe von Gleichung 1.1 - unter Berücksichtigung, dass wieder  $\Delta p := p_d$  ist - liefert

$$F_w = c_w \cdot p_d \cdot A, \quad (2.1)$$

also wie bereits zuvor auch ein linearer Zusammenhang zwischen Staudruck  $p_d$  und Rücktriebskraft  $F_w$ .

Nun soll die Abhängigkeit des Strömungswiderstands der Kreisscheiben vom Staudruck des Luftstroms bestimmt werden. Dafür wird die Widerstandskraft der beiden Kreisscheiben erst bei  $600 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  gemessen und dann schrittweise die Drehzahl um  $200 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  erhöht. Diese Abhängigkeit kann nun über die Werte des Staudrucks, der in Aufgabenteil 1.2 bestimmt wird, aufgetragen werden.

Der Plot 2.2 zeigt eine deutliche Korrelation zwischen der Zunahme der Widerstandskraft und der des Staudrucks, die ab etwa 46 Pa eine lineare Gestalt annimmt. Die nur sehr geringe Zunahme bei niedrigerem Druck ist der Haftreibung zuzuschreiben, die bei niedriger Windstärke das Losrollen des Wagens verhindert und somit die Messergebnisse verfälscht.



**Abbildung 2.2:** Widerstandskraft in Abhängigkeit des Staudrucks bei zwei verschiedenen Kreisscheiben

### 2.3 Rücktrieb und Körperform

Mithilfe der gemessenen Rücktriebskraft  $F_w$  und Informationen über die Oberfläche soll nun der Widerstandsbeiwert  $c_w$  für verschiedene Körper bestimmt werden. Die rotations-symmetrischen Körper sind eine (Halb-)Kugel und ein Stromlinienkörper, wobei alle - der Vergleichbarkeit halber - den gleichen Durchmesser  $d = 5,6$  cm besitzen. Umstellen von Gleichung 2.1 nach dem Widerstandsbeiwert  $c_w$  liefert den Ausdruck

$$c_w = \frac{F_w}{p_d \cdot A},$$

der nun zur Berechnung genutzt werden kann. In einem ersten Schritt werden die Widerstandskräfte der einzelnen Körper gemessen, die für weitere Rechnungen benötigt werden.

Die bei  $2600 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  gemessenen Werte sind in Tabelle 2.2 eingetragen.

Aus diesen Werten können nun die Widerstandsbeiwerte  $c_w$  der Körper berechnet werden. Dafür wird die Formel für den Strömungswiderstand benutzt

$$F_w = c_w \cdot \frac{\rho}{2} u^2 \cdot A, \quad (2.2)$$

wobei  $u$  die Geschwindigkeit und  $\rho$  die Dichte des Mediums und  $A$  die Fläche des umströmten Körpers ist. Der Term  $\frac{\rho}{2} u^2$  kann durch den Staudruck bei  $2600 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  mit  $p_d = 137$  Pa ersetzt werden, der in Aufgabe 1 bestimmt wird. Die Stirnfläche  $A$  ist bei allen benutzten Körpern gleich, da diese alle den gleichen Durchmesser ( $d = 5,6$  cm) besitzen. Damit kann die Formel für  $c_w$  umgeschrieben werden zu

$$c_w = \frac{F}{p_d \cdot \pi \frac{d^2}{4}}, \quad (2.3)$$

mit der die Widerstandsbeiwerte in Tabelle 2.3 berechnet werden können.

Beim Vergleichen mit den Literaturwerten [Dem06] ist es auffällig, dass die Widerstandsbeiwerte der Kugel und der Halbkugel außen mit einer Abweichung von 18,5% und der Halbkugel innen (25,9% Abweichung) noch recht genau übereinstimmen, während der Widerstandsbeiwert der stumpfen Seite des Stromlinienkörpers mit einer Abweichung von 48,3% sehr stark von den Literaturwerten abweicht. Grund für die hohe Abweichung liegt vermutlich an der eher ungenauen Kraftmessung. Für die spitze Seite des Stromlinienkörpers kann kein Vergleichswert gefunden werden.



**Abbildung 2.3:** Die genutzten rotations-symmetrischen Körper

**Tabelle 2.2:** Widerstandskraft der rotationssymmetrischen Körper

Geometrisches Objekt	Widerstandskraft $F_w$ in N
Kugel	0,11
Halbkugel außen	0,11
Halbkugel innen	0,35
Stromlinienkörper stumpfe Seite	0,03
Stromlinienkörper Spitze	0,05

**Tabelle 2.3:** Widerstandsbeiwerte  $c_w$  der rotationssymmetrischen Körper

Geometrisches Objekt	$c_w$ gemessen	$c_w$ Literaturwert
Kugel	0,326	0,4
Halbkugel außen	0,326	0,4
Halbkugel innen	1,037	1,4
Stromlinienkörper stumpfe Seite	0,089	0,06
Stromlinienkörper Spitze	0,148	-

## 2.4 $c_w$ -Wert eines Modellautos

In diesem letzten Versuch zu Strömungswiderständen soll der Widerstandsbeiwert  $c_w$  eines Modellautos berechnet werden. Das zur Verfügung gestellte Modellauto ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Über die Seite [grabcad.com](http://grabcad.com)[CAD] wird eine passende in CAD erstellte Version des Modellautos benutzt, um die Dimensionierung der einzelnen Bauteile zur Stirnflächenberechnung zu ermitteln.

Für das CAD-Modell 2.5 ergibt sich der Zusammenhang

$$1 \text{ mm} = \frac{3}{1100} \text{ cm},$$

1 Millimeter im Modell entsprechen also  $2,727 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$  im Original. Mithilfe geometrischer Überlegungen kann der Flächeninhalt der vorderen Stirnfläche des Modellautos zu  $A = 6,52 \text{ cm}^2$  bestimmt werden.

Um den  $c_w$ -Wert des Modellautos zu bestimmen wird beim gleichen Versuchsaufbau das Auto auf einer Halterung in den Luftstrom gestellt. Wie auch in den Versuchen zuvor ist die Strömungsgeschwindigkeit bei  $2600 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  eingestellt. Mithilfe des Sektorkraftmessers kann dann der Strömungswiderstand  $F_w = 0,05 \text{ N}$  des Modellautos abgelesen werden. Es ist anzumerken, dass das vermerkte Offset von  $0,02 \text{ N}$  direkt beim Ablesen der Messwerte abgezogen wird und nur die korrigierten Daten betrachtet werden. In Aufgabenteil 2.2 wird bereits der Staudruck  $p_d = 137 \text{ Pa}$  für die herrschende Windgeschwindigkeit ermittelt, wodurch dieser Wert übernommen wird. Zusammen mit der über ein Computerprogramm berechneten Stirnfläche  $A$  der Vorderseite des Modellautos lässt sich der Widerstandsbeiwert  $c_w$  berechnen zu

$$c_w = \frac{F}{p_d \cdot A} = \frac{0,05 \text{ N}}{137 \text{ Pa} \cdot 6,52 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,5597.$$

Der berechnete  $c_w$ -Wert liegt in dem für ältere Pickup-Trucks üblichen Bereich und ist somit eine gute experimentelle Näherung. Durch die Optimierung der aerodynamischen Qualität von Fahrzeugen liegt der  $c_w$ -Wert von Serienautos heutzutage im Bereich von 0,3.



Abbildung 2.4: Das genutzte Modellauto

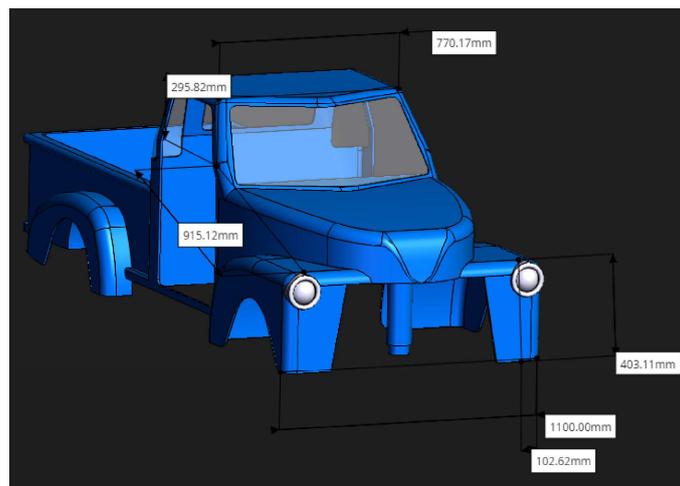


Abbildung 2.5: CAD-Modell des Modellautos

## 3. Tragflügel

### 3.1 Auftrieb und Strömungswiderstand

In dieser Messreihe werden die Flugeigenschaften eines Tragflügel-Modells getestet, in der sowohl Auftrieb als auch Widerstand gemessen werden. Bei einem Anstellwinkel  $\gamma$  ( $\Delta\gamma=5^\circ, -20^\circ \leq \gamma \leq 20^\circ$ ) wird die Widerstands- und Auftriebskraft für Strömungsgeschwindigkeiten von  $2600 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  gemessen.

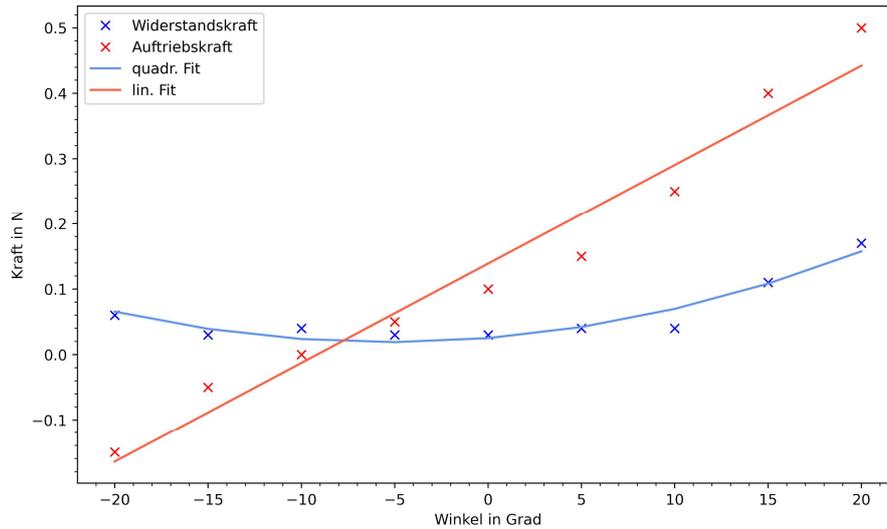
Da die Auftriebskraft proportional zum Anstellwinkel ist wird ein näherungsweise linearer Anstieg erwartet, wobei für reale Messungen die in Plot 3.1 wahrzunehmende S-Kurve der Erwartung entspricht. Der Strömungswiderstand kann wieder über Gleichung 0.1 berechnet werden. Da bei der Messreihe der Anstellwinkel  $\gamma$  und somit die Stirnfläche des Flügels verändert wird ist eine quadratische Gleichung mit Scheitelpunkt bei  $\gamma = 0^\circ$  zu erwarten. Das liegt daran, dass bei einem Anstellwinkel von  $0^\circ$  die Fläche senkrecht zur Windrichtung minimal ist.

Abbildung 3.1 zeigt die Widerstandskraft (blau) und Auftriebskraft (rot) des Tragflügels in Abhängigkeit des Anstellwinkels  $\gamma$ .

Die Auftriebskraft weist - wie erwartet - einen annähernd linearen Anstieg auf und die Widerstandskraft zeigt die Form einer quadratischen Gleichung. Der Scheitelpunkt bei  $\gamma = 0^\circ$  lässt sich hierbei nur schwer ausmachen. Dies ist damit zu erklären, dass der Zeigerausschlag des Sektorkraftmessers ungenau war.

**Tabelle 3.1:** Gleitzahl  $\epsilon$  in Winkelabhängigkeit

Anstellwinkel $\gamma$ in Grad	Gleitzahl $\epsilon$
20	2,94
15	3,64
10	6,25
5	3,75
0	3,33
-5	1,67
-10	0
-15	-1,67
-20	-2,50



**Abbildung 3.1:** Widerstands- und Auftriebskraft in Abhängigkeit des Anstellwinkels mit zugehörigen Fits

Anschließend soll ein Polarendiagramm zur Ermittlung der Gleitzahl erstellt werden. Dabei wird die Auftriebskraft über dem Strömungswiderstand geplottet, um anschließend die Steigung ermitteln zu können, die nun der gesuchten Gleitzahl  $\epsilon$  entspricht. Abbildung 3.2 zeigt das Polarendiagramm der Auftriebskraft über der Widerstandskraft.

An dem Polarendiagramm kann abgelesen werden, dass das optimale Verhältnis von Auftriebskraft zu Widerstandskraft bei einem Anstellwinkel von  $\gamma = 10^\circ$  erreicht wird. Die Steigung  $m$  der Geraden lässt sich durch ein Steigungsdreieck des Punktes und des Ursprungs ermitteln; diese entspricht direkt der gesuchten Gleitzahl:

$$\epsilon = \frac{0,25 \text{ N}}{0,04 \text{ N}} = 6,25$$

In Tabelle 3.1 sind noch einmal die Gleitzahlen für die verschiedenen Anstellwinkel aufgeführt und es ist ersichtlich, dass mit dem Polarendiagramm die günstigste Position (höchste Gleitzahl) des Tragflügels ermittelt wird.

Zwischen dem Gleitwinkel, der dem Anstellwinkel  $\gamma$  entspricht, und der Gleitzahl besteht der Zusammenhang:

$$\tan(\gamma) = \frac{1}{\epsilon}.$$

Mit Hilfe des Gleitwinkels kann berechnet werden, wie schnell ein gleitendes Objekt - beispielweise ein Flugzeug - an Höhe verliert. Das kann nützlich sein um abzuschätzen, wann bei einem Gleitflug gelandet werden muss oder ob Hindernisse noch überflogen werden können. Optimale Flugverhältnisse werden bei hohen Gleitzahlen erreicht, wenn also die Auftriebskraft  $F_A$  deutlich höher als die Widerstandskraft  $F_W$  ist. Dies kann zum Beispiel, wie im Versuch gezeigt, durch Änderung des Anstellwinkels  $\gamma$  oder der Form des Tragflügels erreicht werden.

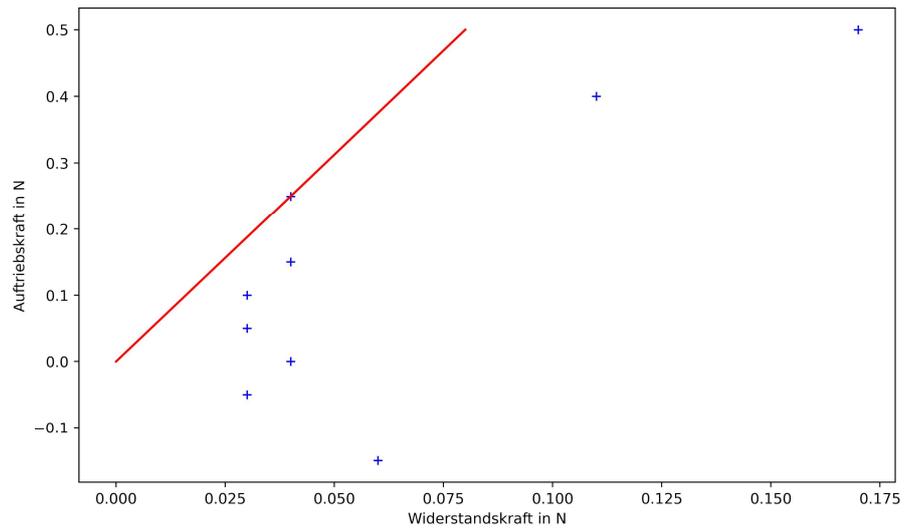


Abbildung 3.2: Polardiagramm der Auftriebskraft über der Widerstandskraft

### 3.2 Druckmessung

In diesem letzten Teil der Versuchsreihe wird eine Druckmessung an neun unterschiedlichen Punkten am Tragflügel durchgeführt und jeweils Unter- beziehungsweise Überdruck für verschiedene Anstellwinkel  $\gamma$  ( $\Delta\gamma=20^\circ, -20^\circ \leq \gamma \leq 20^\circ$ ) gemessen.

Die eingezeichneten Vektoren sollen den Druck darstellen, wobei ein von der Tragfläche weg nach außen zeigender Vektor für Unterdruck und ein nach innen zeigender Vektor für Überdruck steht. Die Vektoren sind nicht maßstabsgetreu und entsprechen somit nicht ihrem skalaren Wert, sondern dienen lediglich der Veranschaulichung. An den Messstellen, an denen die Luft direkt auf den Tragflügel stößt, herrscht Überdruck, während an den Stellen, an denen der Wind vorbeiströmt Unterdruck herrscht. Wie diese Eigenschaften zum Fliegen genutzt werden können wird in Abbildung 3.3 ersichtlich. Über der Tragfläche des Flügels herrscht Unterdruck mit einer resultierenden Aufwärtskraft. Unterhalb des Tragflügels hingegen herrscht ein Überdruck, dessen Kraft ebenfalls nach oben gerichtet ist. Somit gibt es zwei nach oben gerichtete Kräfte, die das Fliegen ermöglichen.

Die Winddüse wird wieder auf  $2600 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  eingestellt und der Druck am Feinmanometer abgelesen. Die dargestellten Werte werden wieder um den Offset von 22 Pa korrigiert.

Bei den positiven Druckwerten in den Zellen handelt es sich um Überdruck und bei den negativen Druckwerten um Unterdruck. Es ist zu erkennen, dass der Auftrieb bei einem Anstellwinkel von  $\gamma = 20^\circ$  maximal und bei  $\gamma = -20^\circ$  minimal ist.

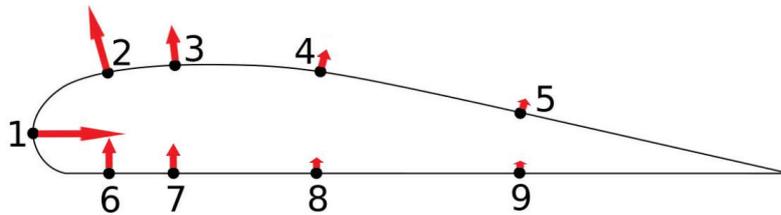


Abbildung 3.3: Druckmesspunkte am Tragflügel bei  $\gamma=20^\circ$

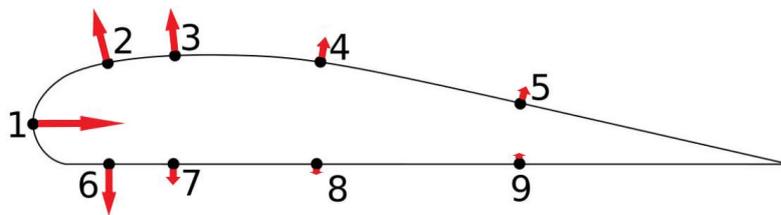


Abbildung 3.4: Druckmesspunkte am Tragflügel bei  $\gamma=0^\circ$

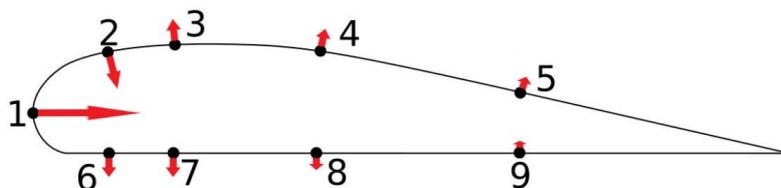


Abbildung 3.5: Druckmesspunkte am Tragflügel bei  $\gamma=-20^\circ$

**Tabelle 3.2:** Druck an den verschiedenen Messlöchern in Winkelabhängigkeit

Loch Nr	Druck in Pa		
	$\gamma = -20^\circ$	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 20^\circ$
1	68	98	33
2	10	-34	-49
3	-14	-33	-28
4	-10	-15	-10
5	-2	-6	-5
6	-64	-13	40
7	-65	-7	30
8	-25	-2	14
9	2	0	5

**Tabelle 3.3:** Drucksummen für verschiedene Anstellwinkel

Loch Nr	Drucksumme $\sum p_i$ in Pa		
	$\gamma = -20^\circ$	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 20^\circ$
2-5	-16	-88	-92
6-9	-152	-22	89

In Tabelle 3.3 werden die Löcher in zwei Gruppierungen unterteilt: Löcher 2-5 befinden sich oberhalb der Tragfläche, während Löcher 6-9 die Löcher unterhalb der Tragfläche bilden. Es ist zu erkennen, dass bei einem positiven Anstellwinkel  $\gamma = 20^\circ$  über dem Tragflügel Unterdruck und unterhalb des Tragflügels Überdruck herrscht, wodurch es zwei nach oben gerichtete Kräfte gibt, die in einem Höhengewinn resultieren. Bei einem negativen Anstellwinkel  $\gamma = -20^\circ$  existiert ein hoher Unterdruck unterhalb des Tragflügels, der eine nach unten gerichtete Kraft auf diesen ausübt und zu Höhenverlust führt.

# Literaturverzeichnis

- [CAD] *Toy Car, Bacardi Modellauto.* <https://grabcad.com/library/pick-up-truck-toy-car-1>, [Zuletzt abgerufen am 22.11.2022].
- [Dem06] Demtröder, W.: *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme.* Springer DE, Berlin, 4. Auflage, 2006, ISBN 3-540-26034-X. [Seite 245, Abb. 8.36].