

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:

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

statischer Druck                      dynamischer                      Gesamtdruck  
    bzw. Staudruck

### 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  $\emptyset$ , 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  $8 \times 10 \text{ cm}^2$  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 (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 Querschnittskizzen 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.

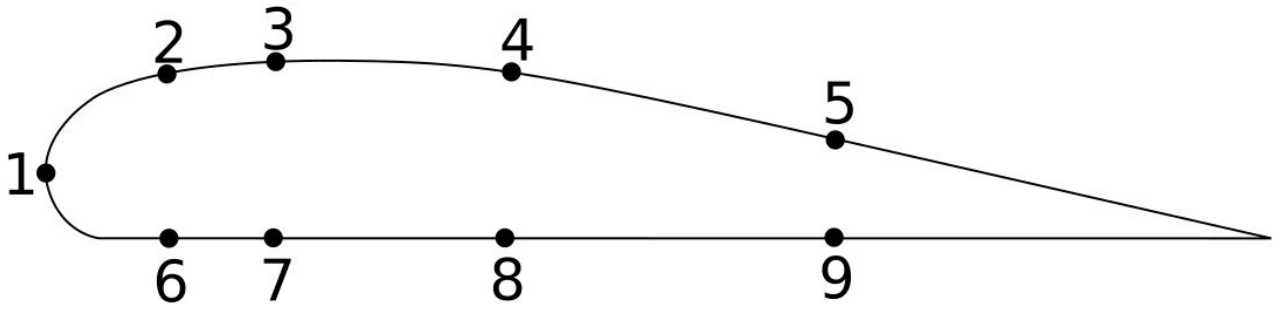
Düse zum Aufstecken ( $\varnothing 100$  mm) mit anschraubbarer Messstrecke (Länge 500 mm) für passenden Messwagen

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