

Versuch: P1-26

Aeromechanik

- Vorbereitung -

Vorbemerkung

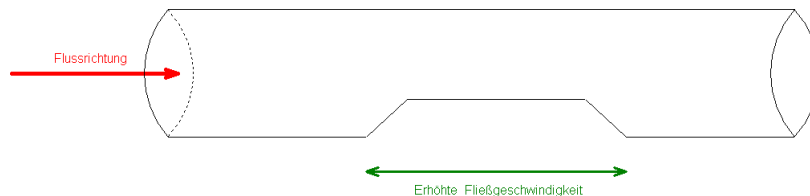
In diesem Versuch geht es darum, die physikalischen Gesetzmäßigkeiten kennen zu lernen, die es Körpern, die schwerer als Luft sind erlauben zu fliegen. Wird nämlich ein Körper von einer Flüssigkeit oder einem Gas umströmt, so erfährt er eine Kraft, für die folgende Relation gilt:

$$F = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \cdot A \tag{1}$$

(mit Widerstandsbeiwert c_w , Dichte des Mediums ρ , Geschwindigkeit des Mediums u , Fläche des umströmten Körpers A). Kann das Medium als nicht komprimierbar angenommen werden, so gilt außerdem die Kontinuitätsgleichung

$$A_1 \cdot u_1 \cdot \rho = A_2 \cdot u_2 \cdot \rho \tag{2}$$

Verengt man also den Querschnitt, durch den das Medium fließt, so erhöht sich die Geschwindigkeit der Flüssigkeit bzw. des Gases.



Das Medium erfährt also eine Beschleunigung und muss demnach eine Krafteinwirkung erfahren haben. Diese Krafteinwirkung entsteht bei Flüssigkeiten / Gasen durch Druckgefälle, am Ort größerer Geschwindigkeit herrscht ein niedrigerer Druck, was durch die Bernoullische Gleichung beschrieben wird:

$$\underbrace{p}_{\text{statischer Druck}} + \underbrace{\frac{\rho}{2} \cdot u^2}_{\text{dynamischer bzw. Staudruck}} = \underbrace{p_0}_{\text{Gesamtdruck}} \tag{3}$$

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----------|
| 0.1 | Druckmessung mit Scheibensonde | 2 |
| 0.2 | Vergleich Rohr- und Scheibensonde | 2 |
| 0.3 | Venturi-Rohr | 3 |
| 0.4 | Druckverlauf an zwei Kreisscheiben | 3 |
| 1 | Untersuchung des Luftstroms | 4 |
| 1.1 | Ortsabhängigkeit des dynamischen Drucks | 4 |
| 1.2 | Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Motorspannung | 4 |
| 2 | Strömungswiderstand | 4 |
| 2.1 | Rücktrieb und Stirnfläche | 4 |
| 2.2 | Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit | 4 |
| 2.3 | Rücktrieb und Körperform, Oberflächenbeschaffenheit | 5 |
| 3 | Tragflügel | 6 |
| 3.1 | Auftrieb und Strömungswiderstand | 6 |
| 3.2 | Druck | 6 |

Demonstrationsversuche

0.1 Druckmessung mit Scheibensonde

Zunächst wird eine Motorspannung von $U = 200 \text{ V}$ eingestellt. Mit einer an ein Feinmanometer angeschlossenen Scheibensonde wird jetzt der Druck im Luftstrom untersucht:

- Wird die Scheibensonde parallel zur Strömungsrichtung in den Luftstrom gehalten, erwarten wir nur eine leichte Änderung des statischen Drucks.
- Wird die Scheibensonde senkrecht zur Strömungsrichtung in den Luftstrom gehalten, messen wir den deutlich höheren Gesamtdruck (statischen + dynamischen Druck).

0.2 Vergleich Rohr- und Scheibensonde

Bei veränderlichen Windgeschwindigkeiten (einstellbar über die Motorspannung U) soll für jede Windgeschwindigkeit der Druck mit folgenden Sondenarrangements gemessen werden:

1. Scheibensonde \parallel Strömungsrichtung
2. Scheibensonde \perp Strömungsrichtung
3. Rohrsonde \parallel Strömungsrichtung
4. Rohrsonde \perp Strömungsrichtung

Diskussion:

- Im Experiment sind große Abweichungen zwischen Rohr- und Scheibensonde zu befürchten, da Luftverwirbelungen an der Rohrsonde zu anderen Messergebnissen führen.
- Weil der dynamische Druck zum Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist, sollte der Gesamtdruck mit höherer Geschwindigkeit zunehmen
- Zur Messung des **statischen Drucks** gibt es folgende Möglichkeiten:
 - Scheibensonde \parallel Strömungsrichtung
 - Rohrsonde \perp Strömungsrichtung

Wegen der oben genannten Verwirbelungen ist in diesem Fall die Scheibensonde zu bevorzugen.

- Der **Gesamtdruck** kann folgendermaßen gemessen werden:
 - Scheibensonde \perp Strömungsrichtung
 - Rohrsonde \parallel Strömungsrichtung

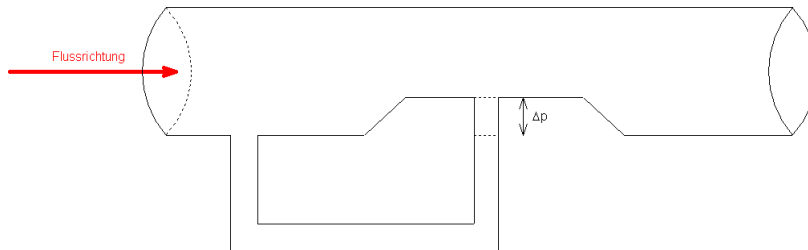
In diesem Fall ist die Rohrsonde vorteilhafter, da ihre Widerstandsfläche gegen den Luftstrom geringer ist.

- Zur Messung des **dynamischen Drucks** baut man auf (jeweils so, dass Verwirbelungen möglichst vermieden werden):
 - Scheibensonde \parallel Strömungsrichtung misst den statischen Druck
 - Rohrsonde \parallel Strömungsrichtung misst den Gesamtdruck

Schließt man nun die beiden Sonden gegeneinander an das Manometer an, misst dieses die Differenz von Gesamtdruck und statischem Druck, was nach Gleichung (3) genau den dynamischen Druck ergibt.

0.3 Venturi-Rohr

Das Venturi-Rohr ermöglicht es, die Differenz des statischen Drucks Δp vor und in einer Rohrverengung zu messen (Prinzip-Skizze):



Zu erwarten ist, dass sich der Druck zur Mitte $\sim \frac{1}{r^4}$ verhält, wobei mit starken Messabweichungen zu rechnen ist. So ist es durchaus möglich, dass aufgrund der Luftreibung der Druck am Ende und am Anfang des Rohres nicht übereinstimmt. Für den Gesamtdruck erwarten wir ein besseres Ergebnis, da das Venturi-Rohr als abgeschlossenes System keinen Druckausgleich mit der Umgebung erlauben sollte.

0.4 Druckverlauf an zwei Kreisscheiben

In diesem Versuchsteil soll die Luft an zwei eng aneinanderliegenden Kreisscheiben radial nach außen strömen. Die Druckmessung soll ebenfalls radial erfolgen. Es ist zu erwarten, dass der dynamische Druck nach außen hin abnimmt, während der statische steigt. Dies liegt daran, dass in den Innenbezirken die Fläche zwischen den Scheiben weit kleiner ist als außen, woraus mit der Kontinuitätsgleichung (2) folgt, dass die Geschwindigkeit nach außen hin abnimmt. Da der dynamische Druck quadratisch von der Geschwindigkeit abhängt (Gleichung (3)), nimmt er quadratisch mit dem Radius ab. Als abgeschlossenes System sollte der Gesamtdruck konstant bleiben, was mit (3) einen steigenden statischen Druck bedingt.

Der Effekt, dass sich die zwei Platten durch die hindurchströmende Luft nicht etwa abstoßen (wie man vielleicht vermuten könnte), sondern anziehen, ist das „Aerodynamische Paradoxon“. Die Anziehung der Platten kommt daher, dass die schnell vorbeifließende Luft einen Unterdruck hervorruft.

1 Untersuchung des Luftstroms

1.1 Ortsabhängigkeit des dynamischen Drucks

In diesem Versuchsteil soll der Staudruck (dynamischer Druck) an verschiedenen Orten (variabel sowohl im Abstand von der Düse als auch von der Mittelachse) im Luftstrom gemessen werden. Hierfür verwenden wir das Prandtl'sche Staurohr, mit dem die gesuchte Größe direkt bestimmt werden kann. Zu den Rändern des Luftstroms hin ist mit einer Abnahme des Druckes zu rechnen, während entlang der Mittelachse ein homogener Luftstrom zu erwarten, der dynamische Druck also konstant ist. Mit diesen Beobachtungen wird anschließend die optimale Position der umströmten Körper für die folgenden Versuche festgelegt.

1.2 Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Motorspannung

Vorbereitend für die weiteren Aufgaben ist die Relation Windgeschwindigkeit - Motorspannung gesucht. Hierzu messen wir an der in 1.1 festgelegten Position den dynamischen Druck, weil dieser mit der Geschwindigkeit u in Relation steht. Nach (3) gilt nämlich:

$$p_d = \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \quad (4)$$

$$\Rightarrow u = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot p_d} \quad (5)$$

Die Geschwindigkeit hängt folgendermaßen von der Motorspannung U ab:

$$u = \text{const} \cdot U^m \quad (6)$$

Setzt man (5) in (6) ein und löst nach m auf, so erhält man für den Exponenten m :

$$m = \frac{\ln \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot p_d}}{\ln U} \quad (7)$$

Trägt man die beiden Ausdrücke logarithmisch auf, so ist die Steigung der Ausgleichsgerade der Messpunkte der gesuchte Exponent m , für den wir ungefähr $m = \frac{2}{3}$ erwarten.

2 Strömungswiderstand

2.1 Rücktrieb und Stirnfläche

Einzustellen ist die konstante Strömungsgeschwindigkeit für die Motorspannung $U = 200$ V. Drei Kreisscheiben werden nun in den Luftstrom gehalten um deren Strömungswiderstand zu bestimmen. Die Messung der Kraft erfolgt per Federwaage. Um allerdings den exakten Wert zu bekommen, muss der Haltestiel separat noch einmal gemessen und die auf ihn einwirkende Kraft von den Ergebnissen abgezogen werden. Für die Kraft sollte (1) gelten:

$$F = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \cdot A \quad (8)$$

Die korrigierten Messwerte sollten also einen linearen Zusammenhang zwischen der Fläche A der Kreisscheiben und der durch den Luftstrom auf sie wirkenden Kraft F liefern.

2.2 Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit

Jetzt soll nur noch die kleine Kreisscheibe verwendet, dafür aber die Windgeschwindigkeit bzw. der Staudruck p_d verändert werden. Die rücktreibende Kraft wird wieder mit Hilfe der Federwaage bestimmt. Aufgetragen werden soll der Widerstand über dem Staudruck, wofür wir wieder einen linearen Zusammenhang erwarten, denn:

Aus den bekannten Formeln (1) und (5)

$$F = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \cdot A \quad (9)$$

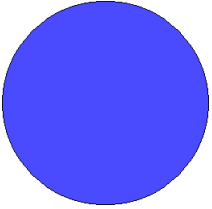


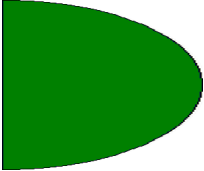
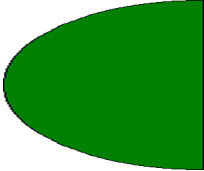
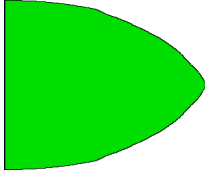
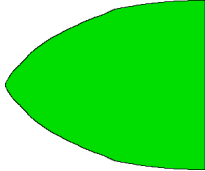
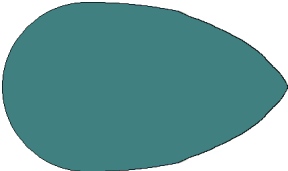
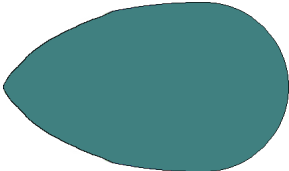
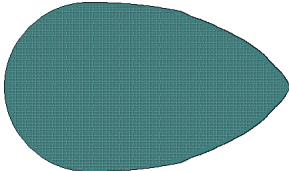
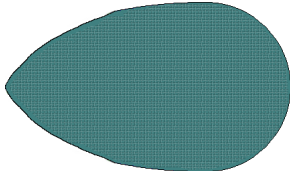
$$u = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot p_d} \quad (10)$$

lässt sich nämlich herleiten:

$$F = c_w \cdot p_d \cdot A \quad (11)$$

2.3 Rücktrieb und Körperform, Oberflächenbeschaffenheit

Folgende Körper werden unter Beachtung ihrer Drehung an die Messposition im Luftstrom gebracht:

| | | | |
|--|--|--|---|
| Kugel  | Halbkugel  | Halbkugel (gedreht)  | |
| Halbkörper mit Rundung  | Halbkörper mit Rundung (gedreht)  | Halbkörper mit Spitze  | Halbkörper mit Spitze (gedreht)  |
| Stromlinienkörper  | Stromlinienkörper (gedreht)  | Stromlinienkörper rau  | Stromlinienkörper rau (gedreht)  |

Bei konstanter Windgeschwindigkeit ($U = 200 \text{ V}$) wird nun die Kraft F notiert, die auf den jeweiligen Körper durch den Luftstrom ausgeübt wird. Da wir ja p_d bereits bestimmt haben, kann man den Widerstandsbeiwert c_w einfach berechnen, in dem man Formel (11) nach c_w auflöst:

$$c_w = \frac{F}{p_d \cdot A} \quad (12)$$

Entsprechen nun die einzelnen c_w -Werte der Körper ihren Literaturangaben, so haben wir Formel (11) experimentell bestätigt.

3 Tragflügel

3.1 Auftrieb und Strömungswiderstand

Wieder soll eine konstante Windgeschwindigkeit ($U = 200 \text{ V}$) eingestellt werden. Für folgende Anstellwinkel sollen zunächst Auftrieb und Strömungswiderstand von gebogener und ebener Platte ($\Delta\alpha = 5^\circ$) gemessen werden:

$$-40^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$$

In Diagrammen sollen dargestellt werden:

- Widerstand über Anstellwinkel
- Auftrieb über Anstellwinkel
- Auftriebswerte über Widerstand (Polarendiagramm)

Dann gilt es, aus dem Polarendiagramm die günstigste Gleitzahl zu bestimmen. Die Beziehung für die Gleitzahl lautet:

$$\varepsilon = \frac{F_w}{F_a} \quad (13)$$

Um nun den optimalen Wert zu erhalten, muss (13) minimiert werden. Aus der Gleitzahl lässt sich direkt der Höhenverlust y pro Meter berechnen:

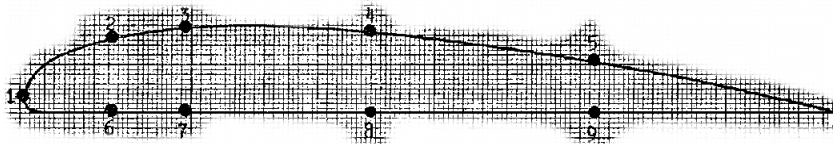
$$\varepsilon = \tan y \quad (14)$$

$$\Rightarrow y = \arctan \varepsilon \quad (15)$$

Ein kleineres y signalisiert also eine bessere Gleiteigenschaft des Körpers. Optimalere Flugeigenschaften dürfte die gebogene Platte haben, der geringste Höhenverlust sollte bei relativ kleinen Winkeln ($\approx 0^\circ$) zu finden sein.

3.2 Druck

Wieder lassen wir den Motor der Windmaschine bei $U = 200 \text{ V}$ laufen. Zum Einsatz kommt wieder das Tragflächenmodell unter verschiedenen Anstellwinkeln, während wir an folgenden Messpunkten den Luftdruck messen:



Wir bekommen so für jeden Anstellwinkel neun Druck-Messwerte, wobei der Druckvektor jeweils senkrecht zu der Fläche steht, an der der Messpunkt sitzt. Die Länge des Vektors ist der skalare Wert des Druckes, den wir an der entsprechenden Stelle gemessen haben. Wir erwarten folgenden Druckverlauf:

- An Stellen, wo die Luft direkt auf die Tragfläche prallt (z.B. Position 1+2) erwarten wir Überdruck
- Weiter hinten gelegene Messpunkte zeigen Unterdruck an, da die Luft schnell an der Öffnung vorbeistreicht

Dies macht man sich zu Nutze, um mit Hilfe einer Tragfläche zu fliegen. Oberhalb der Tragfläche herrscht Unterdruck, weil die Luft hier schneller vorbeistreicht. Es wirkt also eine aufwärts gerichtete Kraft. Der Überdruck unterhalb der Tragfläche drückt diese ebenfalls nach oben - insgesamt also eine „doppelte“ Kraft nach oben.