

# Versuch: P1-26

# Aeromechanik

## - Vorbereitung -

**Vorbemerkung**

In diesem Versuch sollen die Grundlagen verdeutlicht werden, die es Körpern, die schwerer als Luft sind, zu fliegen. Wird ein Körper von einem Gas oder einer Flüssigkeit umströmt, so erfährt er folgende Kraft:

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

wobei  $c_w$  der sogenannte Widerstandsbeiwert ist,  $\rho$  ist die Dichte und  $u$  die Geschwindigkeit des strömenden Mediums,  $A$  bezeichnet die Fläche des umströmten Körpers.

Ist das Medium nicht kompressierbar, so gilt die Kontinuitätsgleichung:

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

Dies hat zur Folge, dass in einem sich verengenden Rohr, in dem ein nicht kompressierbares Gas strömt, dieses automatisch schneller strömen wird, da es durch eine Kraft eine Beschleunigung erfährt. 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:

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

## Inhaltsverzeichnis

<b>0 Demonstrationsversuche</b>	<b>2</b>
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
<b>1 Untersuchung des Luftstroms</b>	<b>4</b>
1.1 Ortsunabhängigkeit von Windgeschwindigkeit und dynamischem Druck . . . . .	4
1.2 Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Motorspannung . . . . .	4
<b>2 Strömungswiderstand</b>	<b>5</b>
2.1 Rücktrieb und Stirnfläche . . . . .	5
2.2 Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit . . . . .	5
2.3 Rücktrieb und Körperform, sowie Oberflächenbeschaffenheit . . . . .	6
<b>3 Tragflügel</b>	<b>6</b>
3.1 Auftrieb und Strömungswiderstand . . . . .	6
3.2 Tragflächendruck . . . . .	7

## 0 Demonstrationsversuche

### 0.1 Druckmessung mit Scheibensonde

Man beginnt bei einer Motorspannung von  $U = 200V$ , hält eine Scheibensonde in den Luftstrom und beobachtet die Anzeige des Manometers, welches an die Scheibensonde angeschlossen ist. Es soll nun die Druckentwicklung bei zwei Positionen der Sonde verglichen werden:

- Zuerst soll die Scheibensonde parallel zur Strömungsrichtung ausgerichtet werden, hier ist nur eine leichte Veränderung des statischen Drucks zu erwarten.
- Nun wird die Sonde senkrecht zur Strömungsrichtung gestellt, der Gesamtdruck sollte sich nun erhöhen (statischer Druck + dynamischer Druck).

### 0.2 Vergleich: Rohr- und Scheibensonde

Es soll nun bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten gemessen werden, was nichts anderes heißt, als dass man die verwendete Motorspannung verändert. Es sollen die folgenden Anordnungen untersucht werden:

- a) Scheibensonde parallel zur Strömungsrichtung
- b) Scheibensonde rechtwinklig zur Strömungsrichtung
- c) Rohrsonde senkrecht zur Strömungsrichtung

Aufgrund der verschiedenen Form und dem daraus resultierenden unterschiedlichen Luftstrom um die Sonden, z.B. Luftverwirbelung bei der Rohrsonde, ist zu erwarten, dass sich die Messungen unterscheiden werden. Für den Druck gilt allgemein, dass er sich aus statischem und dynamischem Druck zusammensetzt, siehe (3). Deshalb folgende Unterscheidung:

- **statischer Druck**

Für die Messung des statischen Drucks bieten sich folgende Messmethoden an:

- Scheibensonde parallel zur Strömungsrichtung
- Rohrsonde senkrecht zur Strömungsrichtung

Da sich, wie erwähnt, bei der Rohrsonde Verwirbelungen der Luft bemerkbar machen werden, ist zur ersten Methode zu raten.

- **Gesamtdruck**

Beim Gesamtdruck ist zuerst zu sagen, dass dieser sich mit steigender Windgeschwindigkeit erhöhen wird, da nach (3) der dynamische Druck proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit ist. Zur Messung gibt es wieder zwei Methoden:

- Scheibensonde senkrecht zur Strömungsrichtung
- Rohrsonde parallel zur Strömungsrichtung

Zur Messung sollte hier die Rohrsonde verwendet werden, da die Scheibensonde (wie der Name schon sagt) die Form einer Scheibe besitzt und demnach einen hohen Luftwiderstand darstellt.

- **dynamischer Druck**

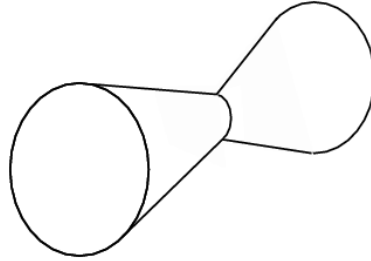
Die Messung des dynamischen Druckes erfolgt indirekt und zwar nach (3) als Differenz von Gesamtdruck und statischem Druck. Diese werden beide nach den für sie am sinnvollsten Methoden gemessen und somit ist der Aufbau:

- Scheibensonde parallel zur Strömungsrichtung (statischer Druck)
- Rohrsonde parallel zur Strömungsrichtung (Gesamtdruck)

Schließt man also beide gegeneinander an das Manometer an, so ergibt die Differenz den dynamischen Druck.

### 0.3 Venturi-Rohr

Es soll bei einem Venturi-Rohr der Verlauf des statischen Druckes gemessen und skizziert werden. Eine Venturi-Düse (auch Venturi-Rohr, nach Giovanni Battista Venturi) besteht aus einem glattwandigen Rohrstück mit zwei gegeneinander gerichteten Konen, die sich in der Mitte, beim geringsten Durchmesser, vereinen. Das Venturi-Rohr erzeugt ohne zusätzliche aktive Motoreinwirkung einen Unterdruck und eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit an der engsten Stelle des Rohres.



Bei der Messung soll auch ein Auge auf den Gesamtdruck längs der Strömung geworfen werden. Da aber das Rohr dicht ist und es somit keine Möglichkeit zum Druckausgleich mit der Umwelt gibt, kann es als geschlossenes System angesehen werden, was hieße, dass sich der Gesamtdruck nicht sonderlich verändern sollte.

Anders verhält es sich mit dem statischen Druck. Zur Mitte hin wird sich dieser Druck proportional zu  $\frac{1}{r^4}$  verhalten und es ist anzunehmen, dass der Druck aufgrund von Luftreibung am Anfangs- und Endpunkt nicht mehr übereinstimmen wird.

### 0.4 Druckverlauf an zwei Kreisscheiben

Es soll nun der Druckverlauf in radialer Richtung bei zwei eng aneinanderliegenden Kreisscheiben gemessen werden, zwischen denen die Luft radial nach außen strömt. Hierbei ist zu erwarten, dass der dynamische Druck nach außen hin abnimmt, während der statische Druck zunimmt. Da in den Innenbezirken die Fläche zwischen den Scheiben kleiner als außen ist, folgt nach (2), dass die Geschwindigkeit abnehmen muss. Somit nimmt der dynamische Druck, der nach (3) quadratisch mit dem Radius abnimmt, ab. Da aber das Gesamtsystem als geschlossen angesehen wird, muss nach (3) der statische Druck steigen.

Der Begriff des *Aerodynamischen Paradoxons* erklärt sich daher, dass man intuitiv vielleicht denken könnte, dass die Platten, wenn Luft zwischen ihnen hindurchströmt, voneinander weggestoßen werden. Dies ist aber nicht der Fall, da die schnell vorbeifließende Luft einen Unterdruck erzeugt, welcher die Platten zueinander hinzieht.

# 1 Untersuchung des Luftstroms

## 1.1 Ortsunabhängigkeit von Windgeschwindigkeit und dynamischem Druck

Dieser Aufgabenteil ist primär vorbereitender Natur: es soll ermittelt werden, an welchen Stellen des Luftstroms wir später unsere Versuche am sinnvollsten durchführen sollten. Wir messen hierfür bei einer Motorspannung von  $U = 200V$ , einem Abstand  $l = 10, 20, 30, 50 \text{ cm}$  vom Düsenrand und einem Radius  $0 \leq r \leq 7 \text{ cm}$ . Mittels des Prandtl'schen Staurohres wird der Staudruck  $p_d$  (dynamischer Druck) gemessen. Dabei ist natürlich zu erwarten, dass sich auf der Mittelachse der Druck homogen und somit konstant verhalten wird und entsprechend, je weiter man sich radial von der Mittelachse entfernt, der Druck immer inhomogener verteilt sein wird. Mit den ermittelten Werten wird dann eine möglichst homogene Stellung der Versuchobjekte bestimmt.

## 1.2 Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Motorspannung

Auch dies ist eine vorbereitende Aufgabe: es soll die Windgeschwindigkeit  $u$  in Abhängigkeit von der angelegten Motorspannung bestimmt werden. Hierzu messen wir, in der Position, die wir in der vorangegangenen Teilaufgabe als die optimalste ermittelt haben, den dynamischen Druck, denn für diesen gilt nach (3):

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

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

Laut Vorbereitungsmappe gilt für die Geschwindigkeit folgende Relation

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

wobei  $U$  die Motorspannung bezeichne. Mittels einsetzen von (5) in (6) ergibt sich  $m$ :

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

Wir können aber (6) mittels (5) auch so umformen, dass wir erhalten:

$$\ln(u) = \ln\left(\sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho}}\right) = m \cdot \ln(U) + \ln(\text{const}) \quad (8)$$

wodurch sich  $m$  als Steigung einer Geraden ergäbe, die man erhielte, wenn  $\ln(u)$  als Funktion von  $\ln(U)$  auftrüge würde. Wir erwarten aufgrund von:

$$\text{Ansatz: } P_{el} = P_{stroem} \quad (9)$$

$$\Rightarrow \frac{U^2}{R} = F \cdot u = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \cdot A \cdot u \quad (10)$$

$$\Rightarrow u^3 = \frac{2 \cdot U^2}{c_w \cdot \rho \cdot A \cdot R} \quad (11)$$

$$\Rightarrow \ln(u) = \frac{2}{3} \cdot \ln(U) + \frac{1}{3} \cdot \ln\left(\frac{2}{c_w \cdot \rho \cdot A \cdot R}\right) \quad (12)$$

eine Steigung von etwa  $m = \frac{2}{3}$ .

## 2 Strömungswiderstand

### 2.1 Rücktrieb und Stirnfläche

In diesem Aufgabenteil soll bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit, d.h. konstanter Motorspannung  $U = 200V$ , der Strömungswiderstand von 3 Kreisscheiben ermittelt werden. Die Messung wird mittels einer Torsionsfederwaage durchgeführt, welche die Kraft auf die 3 Kreisscheiben misst. Wir wollen mit dieser Messung die Proportionalität von Kraft auf den Körper und umströmter Fläche bekräftigen, die Proportionalität sollte nach (1), also

$$F = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \cdot A \quad (13)$$

gelten. Für eine präzise Messung muss allerdings noch die Haltestange abgezogen werden, da diese ja jeweils in den ersten drei Messungen mit erfasst wurde. Somit wird die Kraft auf die Haltestange noch einmal separat gemessen. Es ist also ein linearer Zusammenhang nachzuweisen.

### 2.2 Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit

Wieder wird mittels der Torsionsfederwaage die rücktreibende Kraft auf die kleine Kreisscheibe bestimmt. Diesmal jedoch werden wir den Strömungswiderstand in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (bzw. vom Staudruck  $p_d$ ) messen. Die Veränderung der Windgeschwindigkeit wird, wie schon in vorangegangenen Aufgaben, mittels Verstellung der Motorspannung, hier zwischen 130V und 220V, erreicht. Hat man gemessen, sollen der Widerstand über den Staudruck aufgetragen werden und somit auf die Form der Abhängigkeit geschlossen werden. Diese ist aber nicht schwer zu erkennen, genauer gesagt kennen wir sie implizit bereits, denn es sind uns bereits folgende Formeln bekannt:

$$F = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \cdot A \quad (14)$$

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho}} \quad (15)$$

Setzt man diese schlicht ineinander ein, so erhält man:

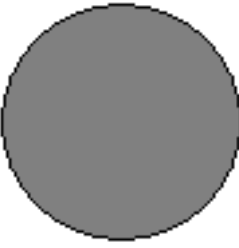


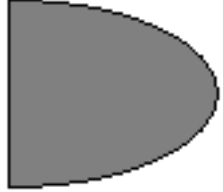



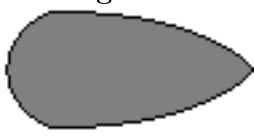



$$F = c_w \cdot p_d \cdot A \quad (16)$$

was nicht anderes bedeutet, als dass wir eine lineare Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Kraft erwarten können.

### 2.3 Rücktrieb und Körperform, sowie Oberflächenbeschaffenheit

Im Folgenden werden die Form und die Oberflächenbeschaffenheit von Körpern näher untersucht - wir messen bei einer Motorspannung von  $U = 200V$  den Strömungswiderstand der unten aufgeführten Körper mit verschiedener Drehung. Dann soll der experimentelle Wert für  $c_w$  errechnet und mit Literaturangaben verglichen werden. Es gilt nach (1) und (16):

$$c_w = \frac{2 \cdot F}{\rho \cdot u^2 \cdot A} = \frac{F}{p_d \cdot A} \quad (17)$$

<b>Kugel</b> 	<b>Halbkugel</b> 	<b>Halbkugel, gedreht</b> 	
<b>Halbkörper mit Spitze</b> 	<b>Halbkörper mit Spitze, gedreht</b> 	<b>Halbkörper mit Rundung</b> 	<b>Halbkörper mit Rundung, gedreht</b> 
<b>Stromlinienkörper glatt</b> 	<b>Stromlinienkörper glatt, gedreht</b> 	<b>Stromlinienkörper rau</b> 	<b>Stromlinienkörper rau, gedreht</b> 

## 3 Tragflügel

Im Folgenden soll untersucht werden, mit welchen Eigenschaften ein Tragflügel ausgestattet sein müsste und wie er generell funktioniert.

### 3.1 Auftrieb und Strömungswiderstand

Wir messen wieder bei konstanter Windgeschwindigkeit, d.h. bei konstanter Motorspannung von  $U = 200V$ , wobei für die Anstellwinkel von  $-40^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$  Auftrieb und Strömungswiderstand einer ebenen und dann einer gebogenen Platte bestimmt werden soll ( $\Delta\alpha = 5^\circ$ ).

Es sind folgende Diagramme zu erstellen:

- Strömungswiderstand über Anstellwinkel
- Auftrieb über Anstellwinkel
- Auftrieb über Strömungswiderstand (*Polarendiagramm*)

wobei aus dem Polarendiagramm die günstigste sog. *Gleitzahl* zu ermitteln ist. Günstig heißt in diesem Fall, dass  $\epsilon$  möglichst klein sein soll:

$$\epsilon = \frac{F_w}{F_a} \quad (18)$$

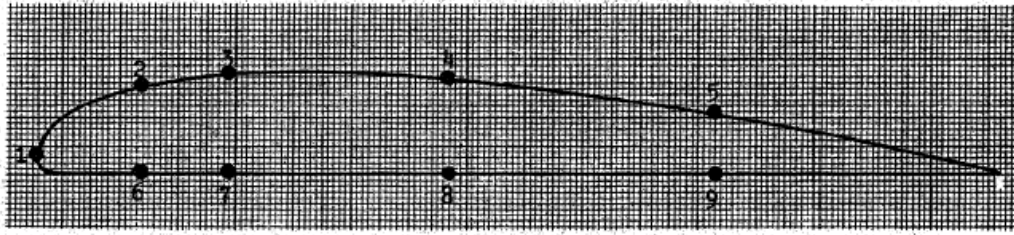
Die Gleitzahl ist ein Maß dafür, wieviel Höhe verloren wird, man kann aus ihr direkt den Höhenverlust  $y$  pro Meter berechnen:

$$\epsilon = \tan(y) \Rightarrow y = \arctan(\epsilon) \quad (19)$$

Je besser ein Körper also gleitet, desto weniger Höhe verliert er. Die praktischste Form für den Flügel wird eine gebogene sein, denn hier strömt die Luft schneller über die gebogene Platte, was einen Unterdruck auf der Oberseite und damit Auftrieb erzeugt. Der Winkel für den geringsten Höhenverlust wird in der Gegend von  $0^\circ$  zu erwarten sein.

### 3.2 Tragflächendruck

Wie vorher ist bei  $U = 200V$  zu messen, am Tragflächenmodell soll bei verschiedenen Anstellwinkeln der Druck gemessen werden und zwar an den folgenden, dafür vorgesehenen Messpunkten:



Somit erhalten wir pro Anstellwinkel neun Werte für den Druck. Der „Druckvektor“ steht senkrecht auf der Fläche, an dem der Messpunkt zu finden ist, die Länge des Vektors ist der skalare Wert des an der Stelle gemessenen Druckes.

Es ist zu erwarten, dass an den vorderen Messpunkten, ein Überdruck herrscht, denn hier trifft die Luft direkt auf die Tragfläche, bei weiter hinten gelegenen Messpunkten wird der bereits erwähnte Effekt, dass sich bei schnell über die Tragfläche streichender Luft ein Unterdruck bilden wird.

Also kurz - Auftrieb wird erzeugt durch:

- Unterdruck über dem Flügel, der ihn nach oben zieht
- Überdruck unter dem Flügel, der ihn nach oben drückt

Mittels dieser beiden Drücke können z.B. Gleitflügzeuge motorlos fliegen.