

# Vorbereitung: Aeromechanik

Marcel Köpke  
Gruppe 7

03.12.2011

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundlagen</b>	<b>3</b>
<b>2 Versuche</b>	<b>6</b>
2.1 Demonstrationsversuche . . . . .	6
2.1.1 D1 . . . . .	6
2.1.2 D2 . . . . .	6
2.1.3 D3 . . . . .	7
2.1.4 D4 . . . . .	7
2.2 Aufgabe 1 . . . . .	7
2.2.1 Messung des dynamischen Drucks . . . . .	7
2.2.2 Messung der Strömungsgeschwindigkeit . . . . .	8
2.3 Aufgabe 2 . . . . .	8
2.3.1 Messung des Strömungswiderstands in Abhängigkeit der Fläche . . . . .	8
2.3.2 Messung des Strömungswiderstands in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit . . . . .	8
2.3.3 Strömungswiderstandskoeffizient bzw. Widerstandsbeiwert . . . . .	8
2.3.4 Strömungswiderstandskoeffizient eines Modellautos . . . . .	8
2.4 Aufgabe 3 . . . . .	9
2.4.1 Anstellwinkel . . . . .	9
2.4.2 Druck in der Nähe eines Flügels . . . . .	9

# 1 Grundlagen

In diesem Praktikum geht es um die Untersuchung der Strömungseigenschaften verschiedener Medien (hier hauptsächlich Luft). Durch dieses Verständnis können dann auch Flugeigenschaften von speziell geformeten Körpern verstanden werden. Außerdem werden wir Größen wie den Strömungswiderstand verschiedener Körper untersuchen.

Die Bernoulli'sche Gleichung wird dabei eine zentrale Rolle bei unseren Versuchen spielen:

$$p_{\text{statisch}} + p_{\text{dynamisch}} = p_{\text{ges}}$$



$$p_{\text{stat}} + \frac{\rho}{2} v_{\text{dyn}}^2 = p_0 (= \text{const})$$

Sie besagt, dass die Summe aus statischem und dynamischem Druck innerhalb eines geschlossenen, wirbelfreien Systems konstant ist. Ist die Fließgeschwindigkeit des Mediums Null ( $v_{\text{dyn}} = 0 \text{ m/s}$ ) kann so der Referenzdruck  $p_0 = p_{\text{stat}}$  bestimmt werden. Für  $p_{\text{dyn}} \neq 0 \text{ Pa}$  ist also der statische Druck kleiner im Vergleich zum stationären Fall. Allerdings wirkt der dynamische Druck nur auf Flächen, die senkrecht zur Fließrichtung stehen! Hat man also zwei verschieden schnelle Strömungen übereinander, durch ein Objekt getrennt, angeordnet, deren dynamischer Druck auf keine Fläche wirkt, so kann durch das Druckgefälle des statischen Drucks (der in alle Richtungen wirkt) ein Auf- bzw. Abtrieb erzeugt werden. Im allgemein gilt:

$$p = \frac{F}{A}$$

D.h. der statische Druck wirkt eine Kraft auf die Flächennormale des trennenden Objekts aus. Der Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite bewirkt somit ein Kräfteungleichgewicht und damit eine Beschleunigung, welche durch geschickte Dimensionierung des trennenden Objekts der Erdbeschleunigung entgegenwirken kann  $\Rightarrow$  das Objekt fliegt.

Nun stellt sich jedoch die Frage wie man eine Strömung dazu anregt schneller zu fließen. Hier kommt die Kontinuitätsgleichung mit ins Spiel:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

Sie gilt für inkompressible Medien und besagt, dass das Volumen  $\Delta V_i$ , welches pro Zeitabschnitt  $\Delta t$  durch die Fläche  $A_i$  fließt für alle Punkte eines geschlossenen Systems konstant ist. Ändert sich also der Fließquerschnitt  $A_i$  des Systems so muss gezwungenermaßen die Fließgeschwindigkeit  $v_i$  diese Änderung ausgleichen.

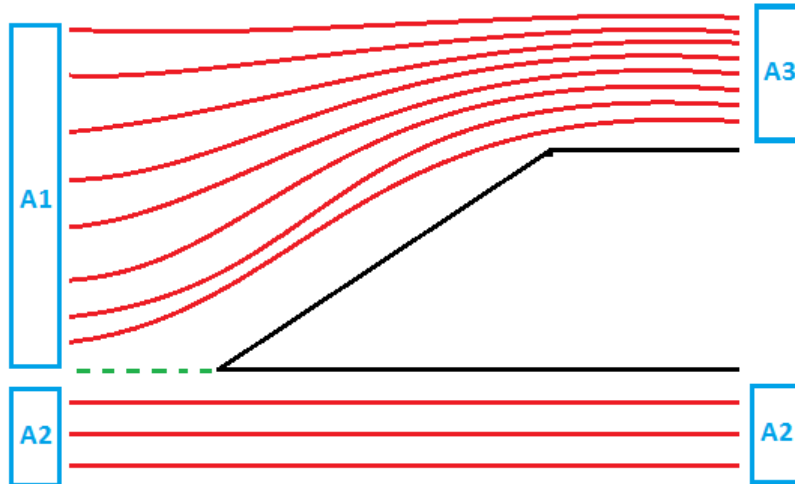


Abbildung 1.1: Strömung

Abbildung 1.1 zeigt vereinfacht eine von links nach rechts um ein Objekt (schwarz) fließende Strömung. Die roten Linien stellen dabei Strömungslinien dar, d.h. die Bewegungsbahn eines sich dort befindlichen Teilchens. Der Strömungsquerschnitt  $A_3$  ist dabei jedoch viel kleiner als  $A_1$ , sodass die Strömungsgeschwindigkeit im oberen Abschnitt stark zunehmen muss. Im unteren Abschnitt bleibt sie jedoch annähernd konstant da sich dort auch der Strömungsquerschnitt kaum ändert. Das Objekt erfährt also wie zuvor besprochen eine resultierende Kraft nach oben. Die Abbildung kann damit als eine (sehr) einfache Darstellung eines Flügels verstanden werden. Es ist klar, dass die Form des Objekts noch in keinsten Weise perfekt ist, aber sie beinhaltet die grundlegende Idee zur Erzeugung eines Auftriebs: die Strömung oberhalb muss schneller sein als diejenige unterhalb des Flügels.

An der ansteigenden Spitze des Objekts übt der dynamische Druck eine Kraft auf das Objekt aus, da die Fläche nicht parallel zur Strömungsrichtung steht. Der Zusammenhang zwischen dynamischen Druck und Kraft wird meist in folgender Gleichung ausgedrückt:

$$F_{dyn} = c_w \cdot p_{dyn} \cdot A$$

$$\Updownarrow$$

$$F_{dyn} = c_w \cdot \frac{\rho}{2} v_{dyn}^2 \cdot A$$

wobei  $A$  die zur Strömung senkrechte Fläche ist. Man findet also, dass die Kraft proportional zum dynamischen Druck und zur umströmten Fläche ist. Der Proportionalitätsfaktor  $c_w$  wird Strömungswiderstandskoeffizient oder Widerstandsbeiwert genannt und ist von Objekt zu Objekt verschieden. Dabei hat die Form und Oberflächenbeschaffenheit des Objekts maßgeblichen Einfluss auf  $c_w$ .

Die Ursache für verschiedene  $c_w$ -Werte kann grundlegend in 3 Kategorien aufgeteilt werden (vgl. Spektrum der Wissenschaft, Juli 1985, «Segelflug und Segelflugzeuge» von Fred Thomas):

- Reibungswiderstand:  
Er entsteht durch auf das Objekt ausgeübte Schubkräfte, welche durch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb einer bestimmten Grenzschicht der Strömung verursacht werden. Dabei sind noch laminare (wirbelfreie) und turbulente Grenzschichtströmungen zu unterscheiden.
- Druckwiderstand:  
Kann die Grenzschichtströmung der Form des Objekts nicht mehr stetig folgen, so reißt diese ab und es entstehen chaotische Strömungszustände (Verwirbellungen). Durch diese kann der dynamische Druck verstärkt auf die Oberfläche des Objekts wirken, sodass sich der dynamische Widerstand des Objekts erhöht.
- induzierter Widerstand:  
An den «Enden» eines Objekts herrscht durch Trennung bzw. Zusammenführen der Strömung dennoch ein kleiner Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite vor. Dieser Unterschied verursacht kleine Randwirbel, die die effektiv umströmte Fläche vergrößern.

## 2 Versuche

### 2.1 Demonstrationsversuche

#### 2.1.1 D1

Die Scheibensonde wird bei konstanter Motordrehzahl einmal parallel zur Strömungsrichtung und einmal senkrecht zu dieser gestellt. Bei paralleler Stellung kann der dynamische Druck nicht mitgemessen werden ( $\rightarrow$ es wird nur statischer Druck gemessen). D.h. bei senkrechter Stellung sollte sich ein höherer Wert einstellen, da der Gesamtdruck gemessen wird.

#### 2.1.2 D2

Nun wird die Motordrehzahl variiert. Dabei wird mit der Scheiben- und Rohrsonde in Unterschiedlichen Stellungen gemessen:

1. Scheibensonde senkrecht zur Strömungsrichtung
2. Scheibensonde prallel zur Strömungsrichtung
3. Rohrsonde senkrecht zur Strömungsrichtung
4. Rohrsonde prallel zur Strömungsrichtung

Die Fälle 1 und 2 sind schon in D1 beschrieben. Im Fall 3 wird wiederrum nur der statische Druck gemessen. Im Fall 4 jedoch der Gesamtdruck. Im Allgemeinen sollte man den Gesamtdruck mit 4 messen, da hier der Strömungswiderstand der Sonde am kleinsten ist, und damit weniger verfälschende Wirbel entstehen. Um den dynamischen Druck zu messen wählt man eine Kombination aus 4 und 2 und bildet die Differenz der beiden Werte.

Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit sollte der dynamische Druck zunehmen. Da das System jedoch zu seiner Umgebung nicht abgeschlossen ist und der Gesamtdruck des Labors als  $p_0 = p_{stat,Labor} = const$  angenommen werden kann kommt es zu einem Druckausgleich, deren Größenordnung hier nicht abgeschätzt werden kann. Man kann vermuten, dass sich der statische Druck kaum ändern und dafür der Gesamtdruck für steigende Strömungsgeschwindigkeiten ansteigen wird.

### 2.1.3 D3

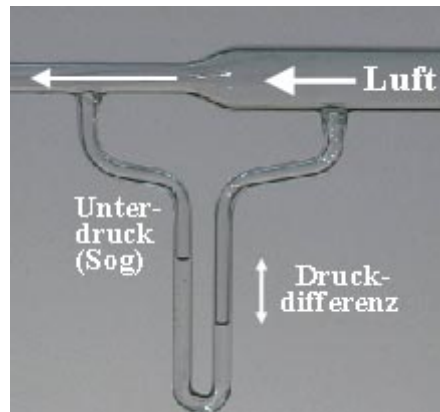


Abbildung 2.1: Venturirohr (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Venturirohr>)

Die Abbildung 2.1 veranschaulicht das Wirkungsprinzip eines sogenannten Venturirohrs, welches hier zum Einsatz kommen soll. Im linken Rohrabschnitt herrscht ein geringerer statischer Druck als im rechten Rohrabschnitt, da das System nach außen abgeschlossen ist. Dadurch stellt sich in der gezeigten Wassersäule eine Höhendifferenz  $\Delta h$  ein. Für den dynamischen und statischen Druck gilt dann:

$$\Delta p_{dyn/stat} = \pm \rho g \Delta h$$

Der (statische) Unterdruck kann dann z.B. zum Ansaugen weiterer Luftmassen genutzt werden, ehe der Strömungsquerschnitt im Venturirohr wieder vergrößert wird ( $\rightarrow$  Venturidüse). Dadurch wird die Strömungsgeschwindigkeit auf der Austrittsseite dauerhaft erhöht.

### 2.1.4 D4

Zwischen zwei parallel angeordneten Kreisscheiben strömt ein Luftstrom radial nach außen. Nach dem Bernoulli'schen Gesetz ist dadurch der statische Druck im «Inneren» vermindert. Der dynamische Druck kann nicht auf die Wände wirken. Somit besteht ein Druckunterschied zwischen dem «Innerem» und dem «Äußerem» der Anordnung und die Scheiben werden bei genügend kleinem Abstand (damit ist das «innere System» annähernd gegenüber der Umgebung abgeschlossen») zusammengezogen.

## 2.2 Aufgabe 1

### 2.2.1 Messung des dynamischen Drucks

Bei diesem Versuch soll man sich davon überzeugen, dass der dynamische Druck der von der Apparatur erzeugten Strömung für die meisten Punkte innerhalb der Strömung konstant ist. Man soll zudem die Grenzen angeben bei denen dies nicht mehr gilt. Es

ist zu erwarten, dass sich bei nicht zu großem Abstand von der Apparatur in der Nähe der Mittelachse eine konstante Strömung einstellen wird.

### 2.2.2 Messung der Strömungsgeschwindigkeit

Hier soll die Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Motordrehzahl bestimmt werden. Dazu misst man den dynamischen Druck bei verschiedenen Drehzahlen und bestimmt damit die Strömungsgeschwindigkeit mit:

$$v_{dyn} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{dyn}}{\rho}}$$

## 2.3 Aufgabe 2

### 2.3.1 Messung des Strömungswiderstands in Abhängigkeit der Fläche

Bei diesem Versuch soll der Strömungswiderstand (d.h. also  $F_{dyn}$ ) auf 3 Kreisscheiben verschiedener Größe bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Nachdem man den Strömungswiderstand des Haltestiels ermittelt hat kann man diesen für die reinen Kreisflächen zurückrechnen. Es sollte sich ein linearer Zusammenhang zur Fläche der Scheiben einstellen, denn es gilt hier:

$$F_{dyn} = const \cdot A$$

### 2.3.2 Messung des Strömungswiderstands in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit

Hier misst man den Strömungswiderstand einer Kreisscheibe bei variabler Strömungsgeschwindigkeit. Für die Strömungsgeschwindigkeit sollte der Zusammenhang quadratisch sein, für den dynamischen Druck wiederum linear, denn es gilt hier:

$$\begin{aligned} F_{dyn} &= const \cdot v_{dyn}^2 \\ F_{dyn} &= const \cdot p_{dyn} \end{aligned}$$

### 2.3.3 Strömungswiderstandskoeffizient bzw. Widerstandsbeiwert

Bei diesem Versuch soll der Strömungswiderstandskoeffizient von verschiedenen Körpern ermittelt werden. Man misst  $F_{dyn}$ ,  $p_{dyn}$  und  $A$  (Fläche senkrecht zur Strömungsrichtung) und erhält daraus:

$$c_w = \frac{F_{dyn}}{p_{dyn} \cdot A}$$

### 2.3.4 Strömungswiderstandskoeffizient eines Modellautos

Analog zu 2.3.3 bloß mit einem Modellauto.



## 2.4 Aufgabe 3

### 2.4.1 Anstellwinkel

Bei diesem Versuch werden die Eigenschaften eines Flügels bezüglich Strömungswiderstand und Auftrieb veranschaulicht. Dazu misst man beide Größen bei verschiedenen Anstellwinkeln des Flügels ( $-20^\circ < \alpha < 20^\circ$ ). Die Ergebnisse werden in einem Polardigramm (Widerstand/Auftrieb) und über den Anstellwinkel  $\alpha$  aufgetragen.

Zudem soll noch die günstigste Gleitzahl ermittelt werden. Dies ist der kleinste Quotient aus Widerstand und Auftrieb (in Abhängigkeit des Anstellwinkels):

$$\epsilon = \frac{F_W}{F_A}$$

Um die Flugeigenschaften eines Flügels zu verbessern kann einerseits sein Auftrieb vergrößert und andererseits sein Widerstand verkleinert werden. Um den Auftrieb zu vergrößern kann man die Wölbung auf der Oberseite vergrößern bzw. eine Einbuchtung auf der Unterseite schaffen (dadurch wird die Strömungsgeschwindigkeit auf der Unterseite verkleinert). Beides ist allerdings nur in einem begrenzten Rahmen möglich. Hierbei wird nämlich auch der Widerstand des Flügels vergrößert!

Um allgemein nur den Widerstand zu verringern kann man die Oberfläche des Flügels durch entsprechende Beschichtungen «glätten» bzw. so anpassen, dass ein gewisses (reibungsaarmes!) Luftpolster durch Mikrowirbel entsteht (vgl. Haifischhaut, Golfball, etc.).

### 2.4.2 Druck in der Nähe eines Flügels

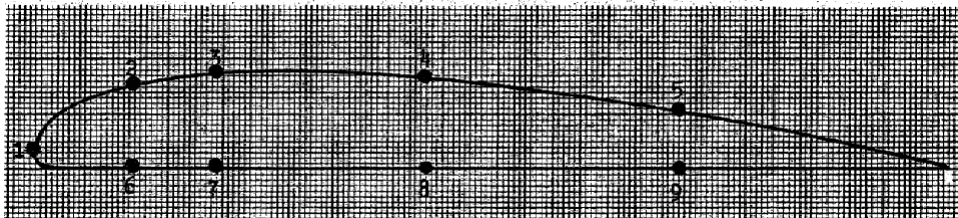


Abbildung 2.2: Messstellen auf dem Flügel (Quelle: Aufgabenblatt)

Bei diesem Versuch soll an den in der Abbildung 2.2 eingezeichneten Stellen der Druck in Abhängigkeit des Anstellwinkels gemessen werden. Die Strömungsgeschwindigkeit ist dabei konstant.

Man kann den Druck dabei als Vektor auffassen, weil jeweils nur die Normalkomponente zur Fläche gemessen wird. Bei Unterdruck zeigt dabei dieser Vektor nach außen (negatives Vorzeichen), bei Überdruck jedoch in den Flügel hinein (positives Vorzeichen). Bildet man dann die Vektorsumme aller 9 Messstellen, so erhält man die Auf- bzw. Abtriebsrichtung und -stärke des Flügels!