

## Luftwiderstand in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit – Messung der Windgeschwindigkeit mit dem Feinmanometer

### Versuchsziele

- Überprüfen, ob der Strömungswiderstand mit der Querschnittsfläche eines Körpers steigt.
- Überprüfen, ob der Strömungswiderstand mit der Strömungsgeschwindigkeit steigt.

### Grundlagen

Der Luftwiderstand oder aerodynamische Strömungswiderstand  $F$  ist definiert als die durch Reibung erzeugte Kraftkomponente in Strömungsrichtung oder entgegen der Bewegungsrichtung eines Körpers:

$$F = c_w \cdot A \cdot \rho_d \quad (I)$$

Der Strömungswiderstandskoeffizient  $c_w$  ist konstant für kleine Mach-Zahlen. Die Fläche  $A$  bezeichnet die maximale Querschnittsfläche des Körpers in Strömungsrichtung. Der dynamische Druck  $\rho_d$  hängt von der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  ab:

$$\rho_d = \frac{\rho}{2} v^2 \quad (II)$$

Luftdichte:  $\rho = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

In diesem Versuch werden drei Widerstandskörper (Kreisscheiben) im Luftstrom positioniert und der Strömungswiderstand  $F$  wird bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten gemessen.

Die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  wird indirekt bestimmt durch eine Drucksonde nach Prandtl und einen Druckmesser. In Strömungsrichtung zeigend misst die Drucksonde nach Prandtl die Druckdifferenz zwischen Totaldruck  $\rho_{\text{tot}}$  und statischem Druck  $\rho_s$ :

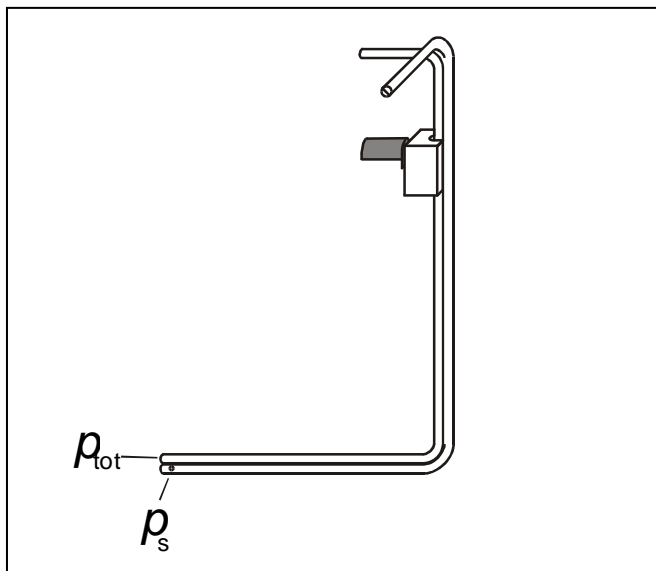
$$\rho_d = \rho_{\text{tot}} - \rho_s \quad (III)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  kann demnach berechnet werden mit

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (\rho_{\text{tot}} - \rho_s)} \quad (IV)$$

*Hinweis: Dieser Versuch ist eng verwandt mit P1.8.6.2, wo der Strömungswiderstand in Abhängigkeit von der Körperform bestimmt wird.*

Fig. 1: Drucksonde nach Prandtl zum Messen des statischen Drucks  $\rho_s$  und Totaldruck  $\rho_{\text{tot}}$ .



**Geräte**

1 Saug- und Druckgebläse .....	373 041
1 Offene Messstrecke zur Aerodynamik .....	373 06
1 Drucksonde nach Prandtl .....	373 13
1 Sektorkraftmesser 0,65 N .....	373 14
1 Messzubehör 1 zur Aerodynamik .....	373 071
1 Messwagen zum Windkanal .....	373 075
1 Feinmanometer .....	373 10
1 Stativfuß, V-förmig, klein .....	300 02
1 Sockel .....	300 11
1 Stativstange, 47 cm, 12 mm Ø .....	300 42

*Optional:*

1 CASSY Lab 2 .....	524 220
---------------------	---------

*Zusätzlich: 1 PC mit Windows XP oder höher*

**Sicherheitshinweise**

Beachten Sie die Sicherheitshinweise in der Gebrauchsanweisung des Saug- und Druckgebläses.

Vor dem Abnehmen des Schutzgitters oder der Düse

- Netzstecker ziehen und
- mindestens 30 Sekunden warten bis das Saug- und Druckgebläse absolut still steht.

**Aufbau**

Geräte wie in Fig. 2 aufbauen. Die Druckseite des Saug- und Druckgebläses muss zur offenen Messstrecke zeigen. Vor der Saugseite und hinter der offenen Messstrecke einen Freiraum von ca. 1 m sicherstellen.

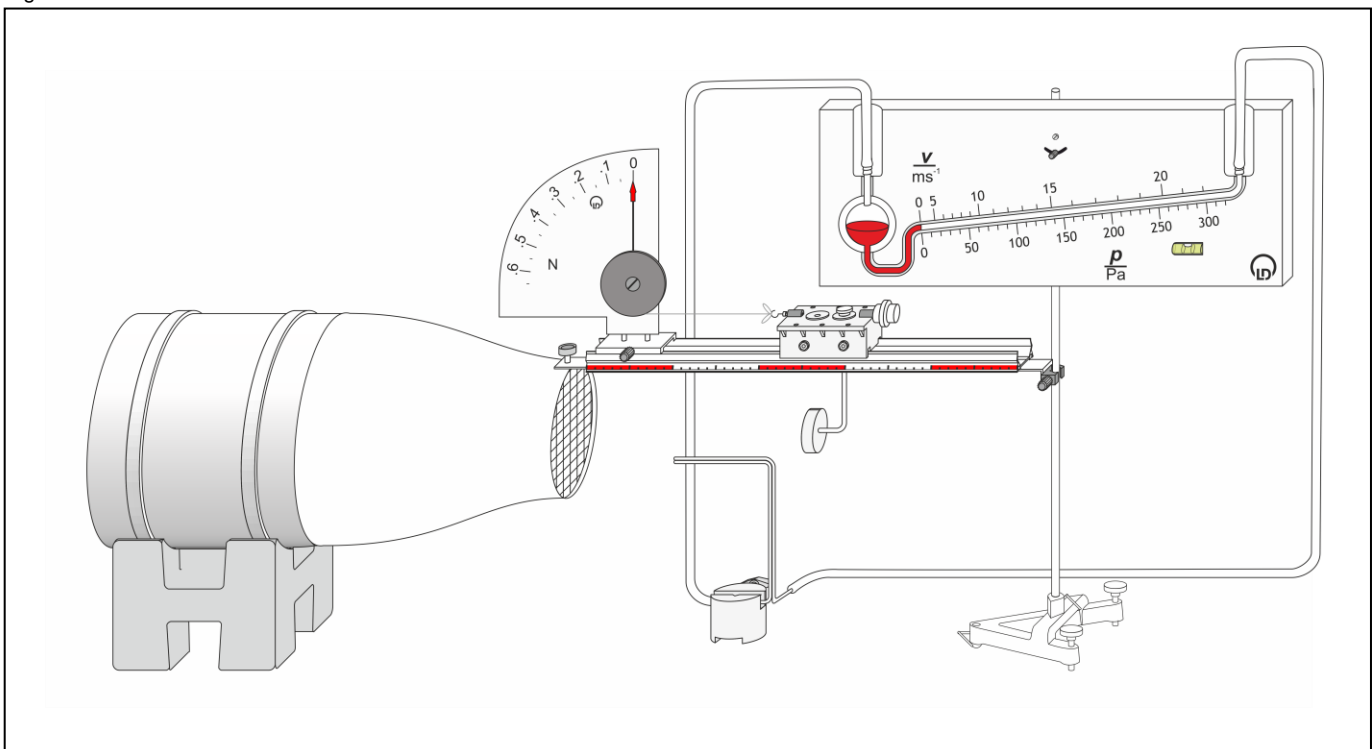
- Feinmanometer exakt horizontal ausrichten. Bei Bedarf Vorratsgefäß für Manometerflüssigkeit nachfüllen.
- Schlauch des Feinmanometers mit Schlauchanschluss für Überdruck (links) verbinden.
- Das andere Ende des Schlauchs mit Messausgang für  $p_{\text{tot}}$  an der Drucksonde nach Prandtl verbinden (vgl. Fig. 1).
- In gleicher Weise Schlauchanschluss für Unterdruck (rechts) des Feinmanometers mit Messausgang für  $p_s$  an der Drucksonde nach Prandtl verbinden (vgl. Fig. 1).

*Hinweis: Es ist entscheidend die Schlauchverbindungen nicht zu verwechseln, da der relative statische Druck  $p_s$  im Luftstrom negativ wird.*

- Überprüfen, ob Führungsschiene horizontal und exakt parallel zur Strömungsrichtung ausgerichtet ist.
- Messwagen wie in Fig. 2 aufbauen. Kleinsten Widerstandskörper (Kreisscheibe, Ø 40 mm) zuerst montieren und Messwagen auf Führungsschiene platzieren. Das 50g-Gegengewicht ist entscheidend für genaue Messergebnisse.
- Schnur zur Kraftübertragung des Sektorkraftmessers 0,65 N am Haken des Messwagens befestigen, so dass Schnur horizontal verläuft. Prüfen, ob Schnur eng an Federdose mit Schnurrille anliegt.
- Messwagen von Sektorkraftmesser 0,65 N wegschieben bis Schnur fast gespannt wird.

*Hinweis: Zusätzliche Informationen in den Gebrauchsanweisungen 373 10, 373 13 und 373 075.*

Fig. 2: Versuchsaufbau mit dem Feinmanometer.



## Durchführung

### a) Messung ohne CASSY Lab 2

- Saug- und Druckgebläse auf minimale Geschwindigkeit stellen (d.h.: linker Anschlag am Potentiometer-Stellknopf). Erst dann einschalten.
- Saug- und Druckgebläse langsam aufdrehen bis Sektorkraftmesser mehr als 0,01 N für den Strömungswiderstand  $F$  anzeigt.


*Hinweis: Um Messfehler durch Reibung zu minimieren, Messwagen vorsichtig gegen Strömungsrichtung schieben und wieder loslassen. Wenn Sektorkraftmesser nicht mehr schwingt, zunächst prüfen, ob Schnur noch in Schnurrille der Federdose liegt. Diesen Schritt mehrmals wiederholen, um einen guten Durchschnittswert zu bestimmen.*




- Dynamischen Druck  $p_d$  sowie Strömungsgeschwindigkeit  $v$  kurz nach Strömungswiderstand  $F$  ablesen und alle Werte in eine Tabelle eintragen.
- Geschwindigkeit von Saug- und Druckgebläse langsam erhöhen bis Strömungsgeschwindigkeit  $v$  ca. 2 m/s höher liegt.
- Vorangegangene Schritte wiederholen bis Sektorkraftmesser 0,65 N dem Maximalausschlag nahe kommt.
- Um einen weiteren Widerstandskörper aufzunehmen, neue Tabellenspalte anlegen. Widerstandskörper (Kreisscheiben:  $\varnothing$  40 mm,  $\varnothing$  56 mm und  $\varnothing$  80 mm) austauschen und vorangegangene Schritte wiederholen.

### b) Messung mit CASSY Lab 2

- Software CASSY Lab 2 öffnen oder installieren, wenn noch nicht vorhanden.
- [Einstellungen in CASSY Lab 2 laden](#).
- Saug- und Druckgebläse auf minimale Geschwindigkeit stellen (d.h.: linker Anschlag am Potentiometer-Stellknopf). Erst dann einschalten.
- Saug- und Druckgebläse langsam aufdrehen bis Sektorkraftmesser mehr als 0,01 N für den Strömungswiderstand  $F$  anzeigt.

*Hinweis: Um Messfehler durch Reibung zu minimieren, Messwagen vorsichtig gegen Strömungsrichtung schieben und wieder loslassen. Wenn Sektorkraftmesser nicht mehr schwingt, zunächst prüfen, ob Schnur noch in Schnurrille der Federdose liegt. Diesen Schritt mehrmals wiederholen, um einen guten Durchschnittswert zu bestimmen.*

- Dynamischen Druck  $p_d$  kurz nach Strömungswiderstand  $F$  ablesen und beide Werte in Tabelle „ $F(p_d)$  [manu.]“ eintragen (linke Seite des Fensters). Strömungsgeschwindigkeit  $v$  wird automatisch in Tabelle „ $F(v)$ “ berechnet.
- Geschwindigkeit von Saug- und Druckgebläse langsam erhöhen bis Strömungsgeschwindigkeit  $v$  ca. 2 m/s höher liegt.
- Vorangegangene Schritte wiederholen bis Sektorkraftmesser 0,65 N dem Maximalausschlag nahe kommt.
- Um einen weiteren Widerstandskörper aufzunehmen, Drop-down-Menü #1  klicken und die nächste Messreihe auswählen. Widerstandskörper (Kreisscheiben:  $\varnothing$  40 mm,  $\varnothing$  56 mm und  $\varnothing$  80 mm) austauschen und vorangegangene Schritte wiederholen.

*Hinweis: Um mehr als die drei vorbereiteten Messreihen aufzunehmen, „Messung“ in der Menüleiste öffnen und  „Neue Messreihe Anhängen“ auswählen. Tabelle „ $F(v)$ “ wählen und einmalig  klicken. Fenster  „Einstellungen“ öffnen und „ $F(v)$ “ im Untermenü „Darstellungen“ markieren. Schaltfläche „Neue Kurve hinzufügen“ klicken und „ $F\#4$ “ im Drop-down-Menü für „y-Achse“ wählen. Analog für „ $F(p_d)$ “.*

**Messbeispiel**

Fig. 3: Strömungswiderstand  $F$  als Funktion des dynamischen Drucks  $p_d$  für den kleinsten Widerstandskörper (Kreisscheibe,  $\varnothing$  40 mm). Die durchgezogene Linie entspricht einer Ursprungsgeraden:  $y = B x$ .

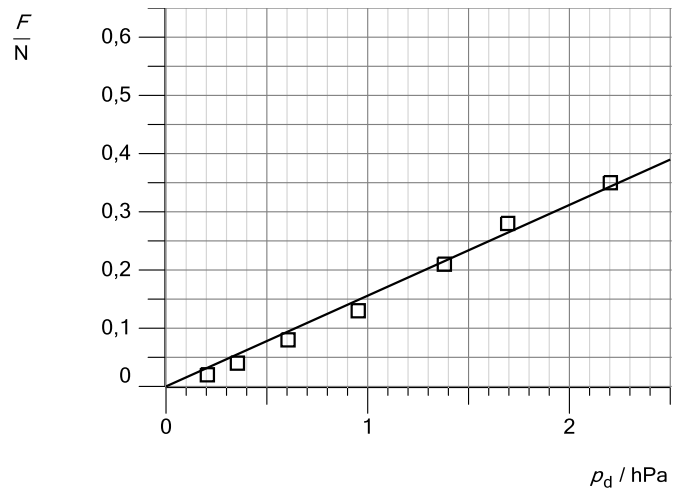
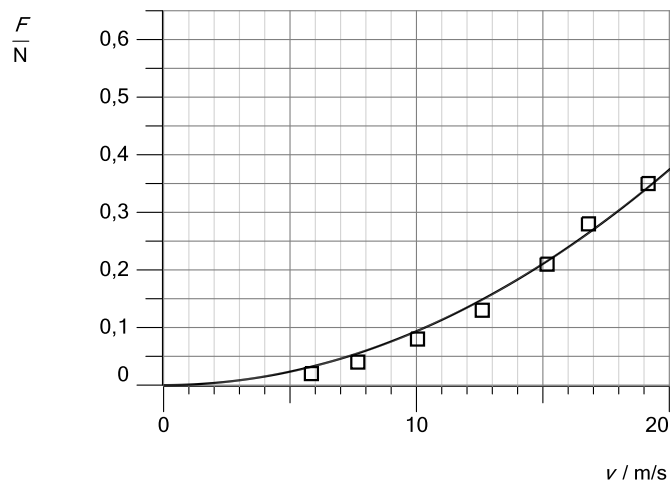


Fig. 4: Strömungswiderstand  $F$  als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  für den kleinsten Widerstandskörper (Kreisscheibe,  $\varnothing$  40 mm). Die durchgezogene Linie entspricht einer Normalparabel:  $y = C x^2$ .



Tab. 1: Dynamischer Druck  $p_d$ , Strömungsgeschwindigkeit  $v$  und resultierender Strömungswiderstand  $F$  für den kleinsten Widerstandskörper (Kreisscheibe,  $\varnothing$  40 mm).

$\frac{p_d}{\text{hPa}}$	$\frac{v}{\frac{\text{m}}{\text{s}}}$	$\frac{F}{\text{N}}$
0,205	5,8	0,02
0,354	7,7	0,04
0,605	10,0	0,08
0,953	12,6	0,13
1,380	15,2	0,21
1,694	16,8	0,28
2,203	19,2	0,35

**Auswertung und Ergebnisse**

Fig. 5: Strömungswiderstand  $F$  als Funktion des dynamischen Drucks  $p_d$  für drei Widerstandskörper (Kreisscheiben:  $\varnothing 40$  mm,  $\varnothing 56$  mm,  $\varnothing 80$  mm) mit unterschiedlichen Querschnittsflächen. Durchgezogene Linien entsprechen Ursprungsgeraden:  $y = B \cdot x$

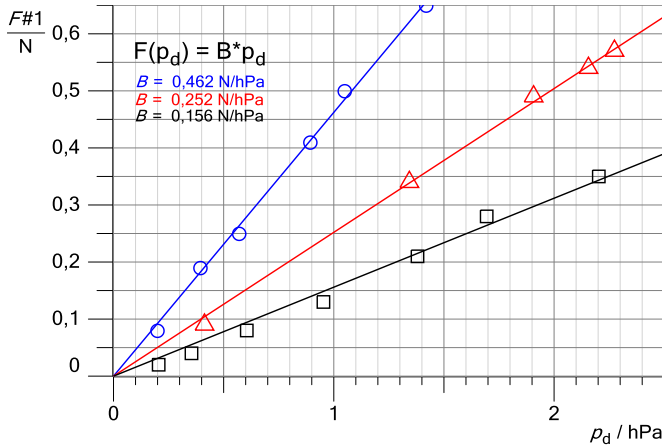
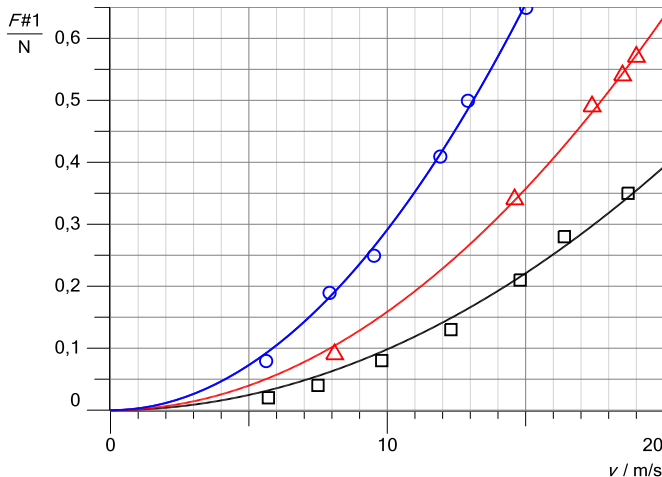


Fig. 6: Strömungswiderstand  $F$  als Funktion des dynamischen Drucks  $p_d$  für drei Widerstandskörper (Kreisscheibe,  $\varnothing 40$  mm,  $\varnothing 56$  mm,  $\varnothing 80$  mm) mit unterschiedlichen Querschnittsflächen. Durchgezogene Linien entsprechen Normalparabeln:  $y = B \cdot x^2$ .



Wenn die Querschnittsfläche  $A$  des Widerstandskörpers sich verdoppelt, verdoppelt sich auch der Strömungswiderstand  $F$  (z.B.: In Fig. 5 bei  $p_d = 0.8$  hPa liegen die Werte der Ausgleichsgeraden fast bei **0,1 N**, **0,2 N** und **0,4 N**):

$$F \propto A$$

Die Messergebnisse bestätigen daher Gleichung (I).

Ersetzen des dynamischen Drucks  $p_d$  in Gleichung (I) liefert:

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

Der Strömungswiderstand  $F$  steigt mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit  $v$ . Die Anpassungsfunktion ist eine Normalparabel (Fig. 6):

$$F \propto v^2$$

Die Messergebnisse bestätigen daher Gleichung (V).

**Zusatzinformation**

Ferner kann die Funktion  $F(A)$  durch Austausch der drei Widerstandskörper bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , bzw. konstantem, dynamischen Druck  $p_d$ , ermittelt werden.

Mit der CASSY Lab 2 Software ist es möglich die Funktion  $F(A)$  bei beliebigen Strömungsgeschwindigkeiten  $v$  bzw. Drücken  $p_d$  zu bestimmen, sogar wenn die Messreihen keine gemeinsamen Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Drücke aufweisen:

- Eine Messreihe im Diagrammfenster für  $F(p_d)$  durch Klick auf ihren ersten oder letzten Messpunkt auswählen.
- Rechtsklick auf markierten Messpunkt,  $f(x)$  „Anpassung durchführen“ und dann  $\swarrow$  „Ursprungsgerade“ wählen.
- Mit gehaltenem Linksklick über alle Messpunkte der Messreihe ziehen und die gewählte Anpassungsfunktion erscheint automatisch.
- Rechtsklick auf erstellte Anpassungsfunktion,  $+$  „Markierung setzen“ auswählen und  $ABC$  „Text (Alt+T)“ klicken. Ein Text ähnlich wie „ $\$A\$ = 0,0156$  N/hPa“ erscheint. Die Querschnittsfläche  $A$  darf an dieser Stelle nicht mit dem mathematischen Skalierungsfaktor  $\$A\$$  verwechselt werden. Empfehlung:  $\$A\$$  in  $\$B\$$  umbenennen.
- Diese Schritte für übrige Messreihen wiederholen.

Diese Analyse lieferte den mathematischen Skalierungsfaktor  $B$  für jede Messreihe.

Aus Gleichung (I) folgt, dass der mathematische Skalierungsfaktor  $B$  hier definiert ist als:

$$B = c_w \cdot A \quad (VI)$$

Bei bekannter Querschnittsfläche  $A$  können die  $c_w$ -Werte berechnet werden. Daraus folgen Werte für die Funktion  $F(A)$  bei beliebig wählbarem dynamischen Druck  $p_d$ :

$\frac{B}{\frac{N}{Pa}}$	$\frac{A}{m^2}$	$c_w$	$\overline{c_w}$
0,00462	0,0050	0,9	1,1
0,00252	0,0025	1,0	
0,00156	0,0013	1,2	

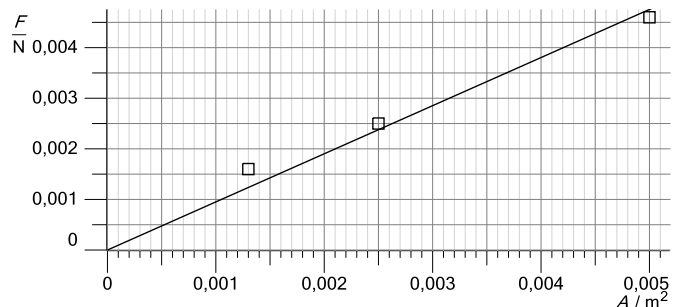


Fig. 7: Strömungswiderstand  $F$  von Kreisscheiben als Funktion der Querschnittsfläche  $A$ . Werte berechnet aus den Anpassungsfunktionen aller drei Messreihen für  $p_d = 1$  Pa.

Die Steigung von  $\overline{F(A)}$  entspricht  $\overline{c_w} \cdot p_d$ . Wird  $p_d = 1$  Pa (nicht hPa) gewählt, vereinfacht sich die Steigung aus  $\overline{F(A)}$  zu  $\overline{c_w}$ .

*Hinweis: Der Strömungswiderstandskoeffizient  $c_w$  wird in P1.8.6.2 direkt bestimmt.*