

## Luftwiderstand in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit – Messung der Windgeschwindigkeit mit Drucksensor und CASSY

### 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  $\rho_s$ :

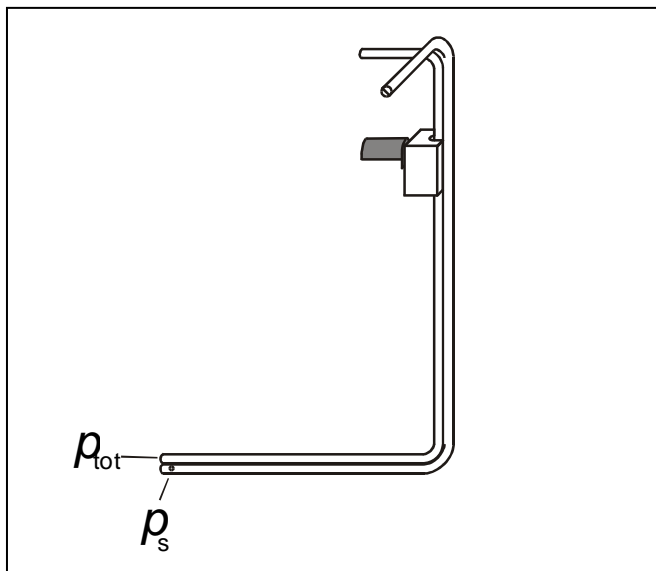
$$\rho_d = \rho_{\text{tot}} - \rho_s \quad (III)$$

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 P1.8.6.5, 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 Sensor-CASSY 2 .....	524 013
oder	
1 Mobile-CASSY .....	524 009A
oder	
1 Pocket-CASSY 2 Bluetooth .....	524 018
1 CASSY Lab 2 .....	524 220
1 Drucksensor S, ±70 hPa .....	524 066
1 Stativfuß, V-förmig, klein .....	300 02
1 Sockel .....	300 11
1 Stativstange, 47 cm, 12 mm Ø .....	300 42

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.

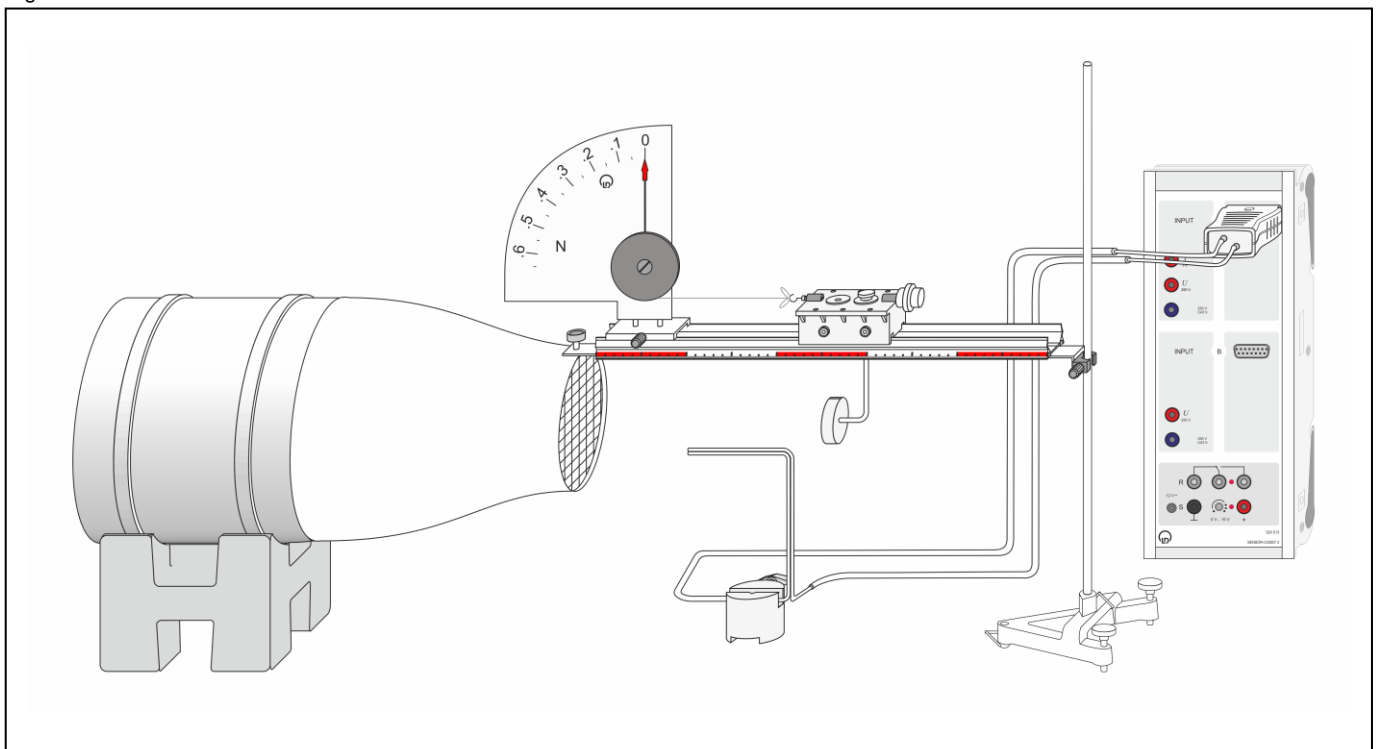
- Drucksensor S, ±70 hPa in Eingang A von Sensor-CASSY 2 (Fig. 2) oder Mobile-CASSY (Fig. 4) stecken.
- 3-mm-Schlauch aus Druckanschluss  $p_1$  (oben) von Drucksensor S mit 5-mm-Schlauch der Drucksonde nach Prandtl verbinden.
- Anderes Ende des 5-mm-Schlauchs mit  $p_{tot}$ -Ausgang an Drucksonde nach Prandtl verbinden (vgl. Fig. 1).
- Auf die gleiche Weise Druckanschluss  $p_2$  (unten) von Drucksensor S mit  $p_s$ -Ausgang 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 13, 373 075 und 524 066.*


Fig. 2: Versuchsaufbau mit Sensor-CASSY 2.

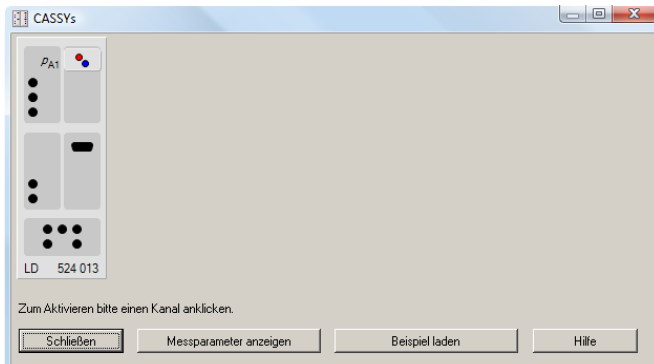


## Durchführung


- Software CASSY Lab 2 öffnen oder installieren, wenn noch nicht vorhanden.

### a) Messung mit Sensor-CASSY 2



- [Einstellungen in CASSY Lab 2 laden](#).
- Verbundener Drucksensor S wird angezeigt, wenn Sensor-CASSY 2 eingeschaltet und via USB-Port an den Computer angeschlossen ist.
- Verbundenen Drucksensor S im Eingang A mit Klick auf  aktivieren.






*Hinweis: Zusätzliche Informationen zum Verbinden von Sensoren mit Sensor-CASSY 2 im Handbuch zu CASSY Lab 2 oder in der Onlinehilfe.*

- Drucksensor S mit Klick auf  nullen. Dazu im Fenster „Einstellungen“ das Untermenü „Relativdruck  $p_{A1}$ “ markieren. Saug- und Druckgebläse auf minimale Geschwindigkeit stellen (d.h.: linker Anschlag am Potentiometer-Stellknopf). Erst dann einschalten.
- Geschwindigkeit von Saug- und Druckgebläse langsam erhöhen 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.*

- Wert von Sektorkraftmesser in CASSY Lab 2 in Spalte für Strömungswiderstand  $F$  eintragen (linke Seite des Fensters).
- Um zugehörige Strömungsgeschwindigkeit  $v$  mit CASSY Lab 2 aufzunehmen, kurz nach Ablesen von  $F$  auf  klicken.
- 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: Ø 40 mm, Ø 56 mm und Ø 80 mm) austauschen und vorangegangene Schritte wiederholen.

*Hinweis: Die Schaltfläche  erscheint im Fenster „Einstellungen“ , wenn „Relativdruck  $p_{A1}$ “ im Untermenü von „CASSYs“ markiert ist. Empfehlung: Die -Schaltfläche vor jeder Messreihe betätigen.*

### b) Messung mit Mobile-CASSY


*Hinweis: Um die Druckwerte automatisch aufzunehmen, Anleitung a) befolgen.*




- Mobile-CASSY mit  einschalten.
- Hauptmenü durch erneutes Drücken von  öffnen.
- Untermenü „Messgrößen“ mit  oder  auswählen und mit rechtem -Knopf bestätigen.
- Untermenü „p“ mit rechtem -Knopf auswählen.
- „Offset korrigieren“ auswählen und den Druckwert durch Drücken des rechten -Knopfs auf null setzen.
- -Knopf und dann linken -Knopf drücken, um den aktuellen Druckwert anzuzeigen.

*Hinweis: Es wird empfohlen den Druckwert vor jeder Messreihe auf null zu setzen. Zusätzliche Informationen zur Benutzung von Mobile-CASSY in der Gebrauchsanweisung (524 009A).*

- Saug- und Druckgebläse auf minimale Geschwindigkeit stellen (d.h.: linker Anschlag am Potentiometer-Stellknopf). Erst dann einschalten.
- Geschwindigkeit von Saug- und Druckgebläse langsam erhöhen 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.*

- [Einstellungen in CASSY Lab 2 laden](#).
- Zugehörigen 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 dynamischer Druck  $p_d$  ca. 30% 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: Ø 40 mm, Ø 56 mm und Ø 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:  $y = B \cdot x$ .

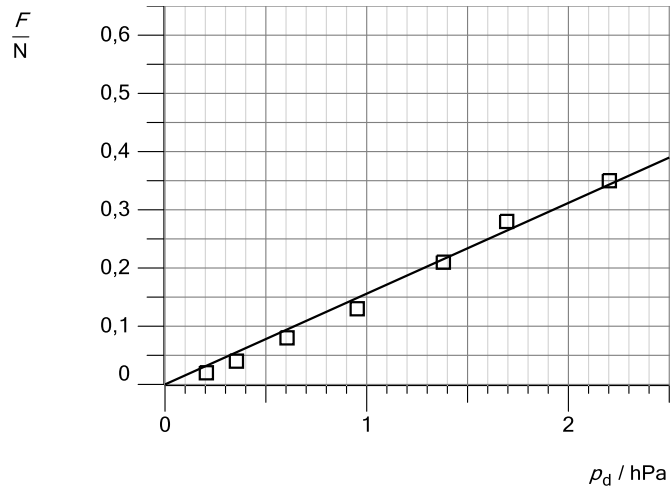
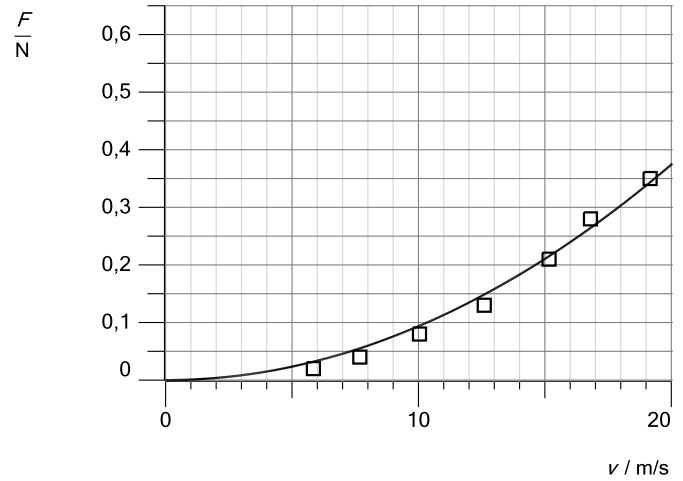


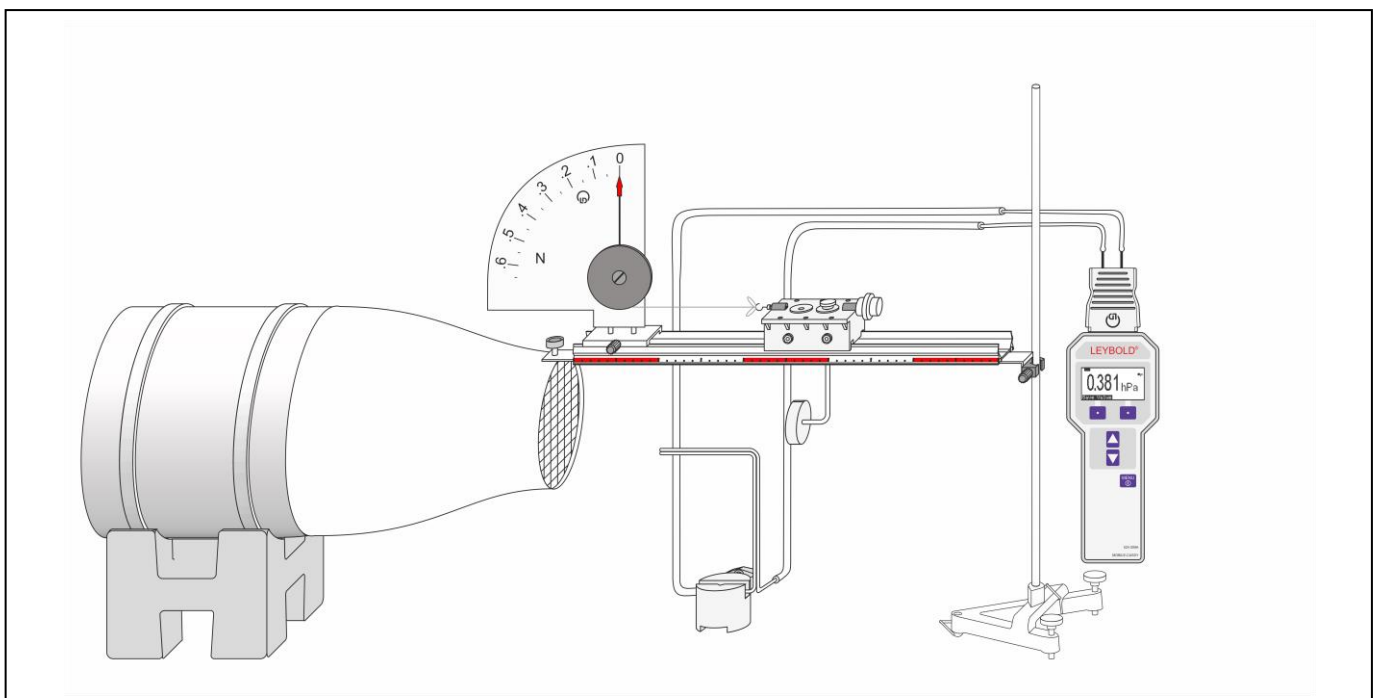
Fig. 5: Strömungswiderstand  $F$  als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  für den kleinsten Widerstandskörper (Kreisscheibe,  $\varnothing$  40 mm). Die durchgezogene Linie entspricht einer Normalparabel:  $y = C \cdot x^2$ .



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

Fig. 4: Versuchsaufbau mit Mobile-CASSY.



**Auswertung und Ergebnisse**

Fig. 6: 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:  $y = B \cdot x$

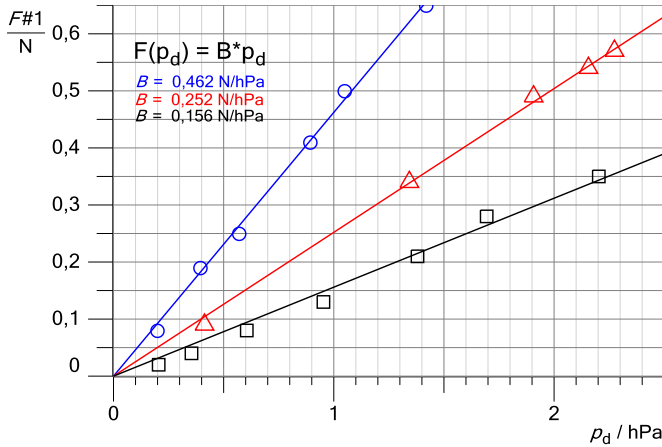
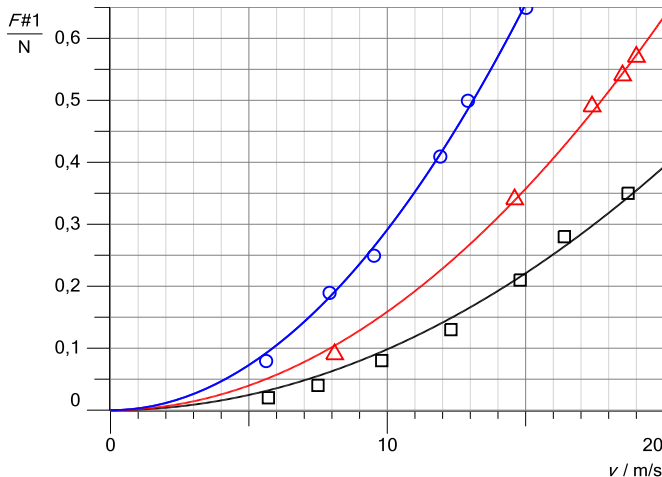


Fig. 7: Strömungswiderstand  $F$  als Funktion des dynamischen Drucks  $p_d$  für drei Widerstandskörper (Kreisscheibe,  $\varnothing 40$  mm,  $\varnothing 56$  mm,  $\varnothing 80$  mm) mit unterschiedlichen Querschnittsflächen. Durchgezogene Linien entsprechen Normalparabeln:  $y = B \cdot x^2$ .



Wenn die Querschnittsfläche  $A$  des Widerstandskörpers sich verdoppelt, verdoppelt sich auch der Strömungswiderstand  $F$  (z.B.: In Fig. 6 bei  $p_d = 0.8$  hPa liegen die Werte der Ausgleichsgeraden fast bei **0,1 N**, **0,2 N** and **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. 7):

$$F \propto v^2$$

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  $\blacktriangleleft$  „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 „ $\$A\$ = 0,0156 \text{ N/hPa}$ “ 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	

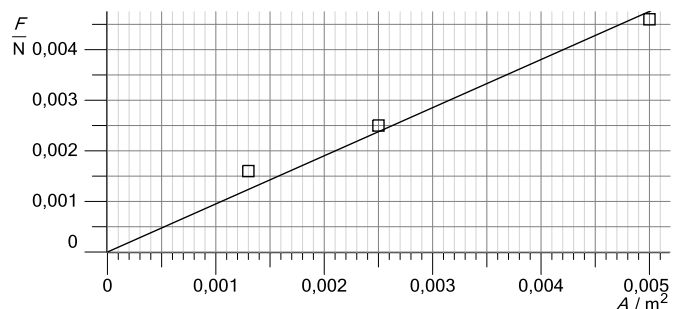


Fig. 8: Strömungswiderstand  $F$  von Kreisscheiben als Funktion der Querschnittsfläche  $A$ . Werte berechnet aus den Anpassungsfunktionen aller drei Messreihen für  $p_d = 1$  Pa.

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 P1.8.6.5 direkt bestimmt.*