

Druckverlauf an einem Tragflächenprofil – Druckmessung mit dem Feinmanometer

Versuchsziele

- Druckverlauf an einem Tragflächenprofil für verschiedene Anstellwinkel messen.
- Anteil des statischen Druckunterschiedes am Auftrieb bestimmen.
- Auftriebserklärung durch das Bernoulli-Prinzip relativieren.
- Kritische Distanz zu scheinbar gesichertem Bücherwissen entwickeln.

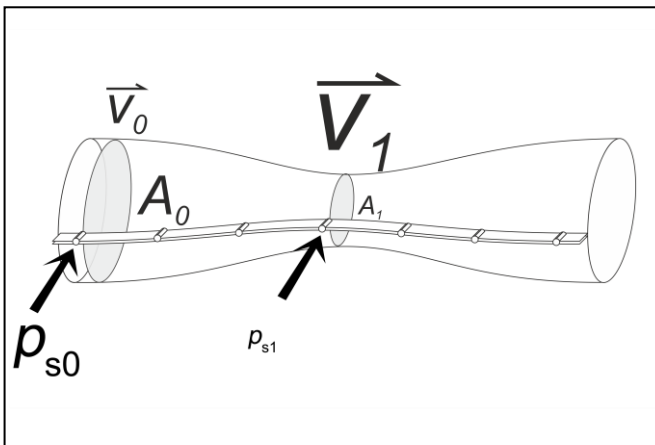
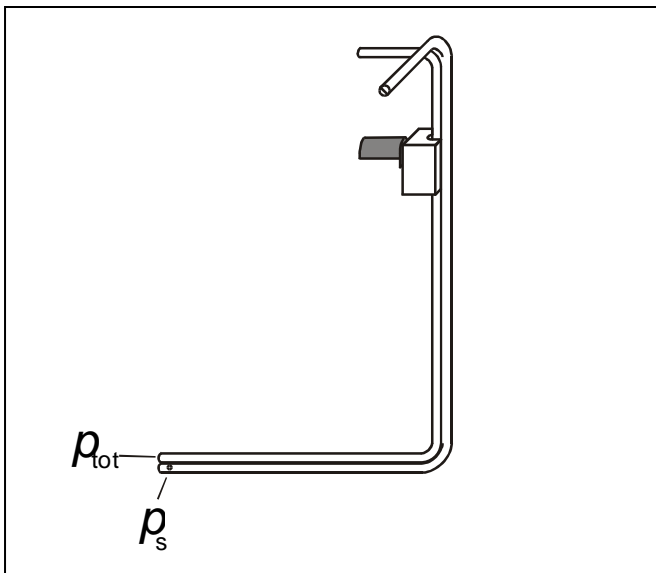


Fig. 1: Bernoulli-Prinzip: Querschnittsfläche A , Strömungsgeschwindigkeit v , statischer Druck p_s . Schriftgröße proportional zur physikalischen Größe.

Fig. 2: Drucksonde nach Prandtl zum Messen des statischen Drucks p_s und Totaldrucks p_{tot} .



Grundlagen

Lange Zeit wurde in physikalischen Lehrbüchern der aerodynamische Auftrieb an Tragflächen mit dem Druckabfall durch das Bernoulli-Prinzip begründet. In diesem Versuch wird empirisch überprüft wie viel Anteil der Unterschied des statischen Drucks Δp_s an der Auftriebskraft F erklärt.

Bernoullis Gesetz beschreibt das Verhältnis zwischen dem statischen Druck p_s und der Strömungsgeschwindigkeit v . Für reibungsfreie, horizontale Strömungen durch ein unbewegtes Rohr zwischen den Punkten 0 und 1 liefert folgende Formel gute Näherungen:

$$p_{s0} + \frac{\rho}{2} v_0^2 = p_{s1} + \frac{\rho}{2} v_1^2 \quad (I)$$

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

Der unzureichende Erklärungsansatz lautet: Durch die größere Weglänge der Luft, an der Oberseite einer gekrümmten Tragfläche, kommt es zu einem Druckunterschied des statischen Drucks Δp_s , welcher die Tragfläche anhebt.

Damit wird die theoretische Auftriebskraft F_T definiert über Fläche und Druck:

$$F_T = A \cdot \Delta p_s \quad (II)$$

Fläche des Tragflächenmodells: A

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 p_{tot} und statischem Druck p_s :

$$p_d = p_{tot} - p_s \quad (III)$$

Dynamischer Druck: p_d

Die Strömungsgeschwindigkeit v kann demnach berechnet werden mit

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_{tot} - p_s)} \quad (IV)$$

Hinweis: Dieser Versuch hat großen Bezug zu P1.8.7.1, wo die Auftriebskraft an einer Tragfläche direkt gemessen wird. P1.8.5.1 sowie P1.8.7.3 sind ebenfalls eng verwandt.

Geräte

1 Saug- und Druckgebläse	373 041
1 Offene Messstrecke zur Aerodynamik	373 06
1 Drucksonde nach Prandtl	373 13
1 Tragflächenmodell	373 70
1 Feinmanometer	373 10
1 Stativstange 47 cm, 12 mm Ø	300 42
2 Stativfuß, V-förmig, klein.....	300 02

Optional:

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

Zusätzlich benötigt: 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.

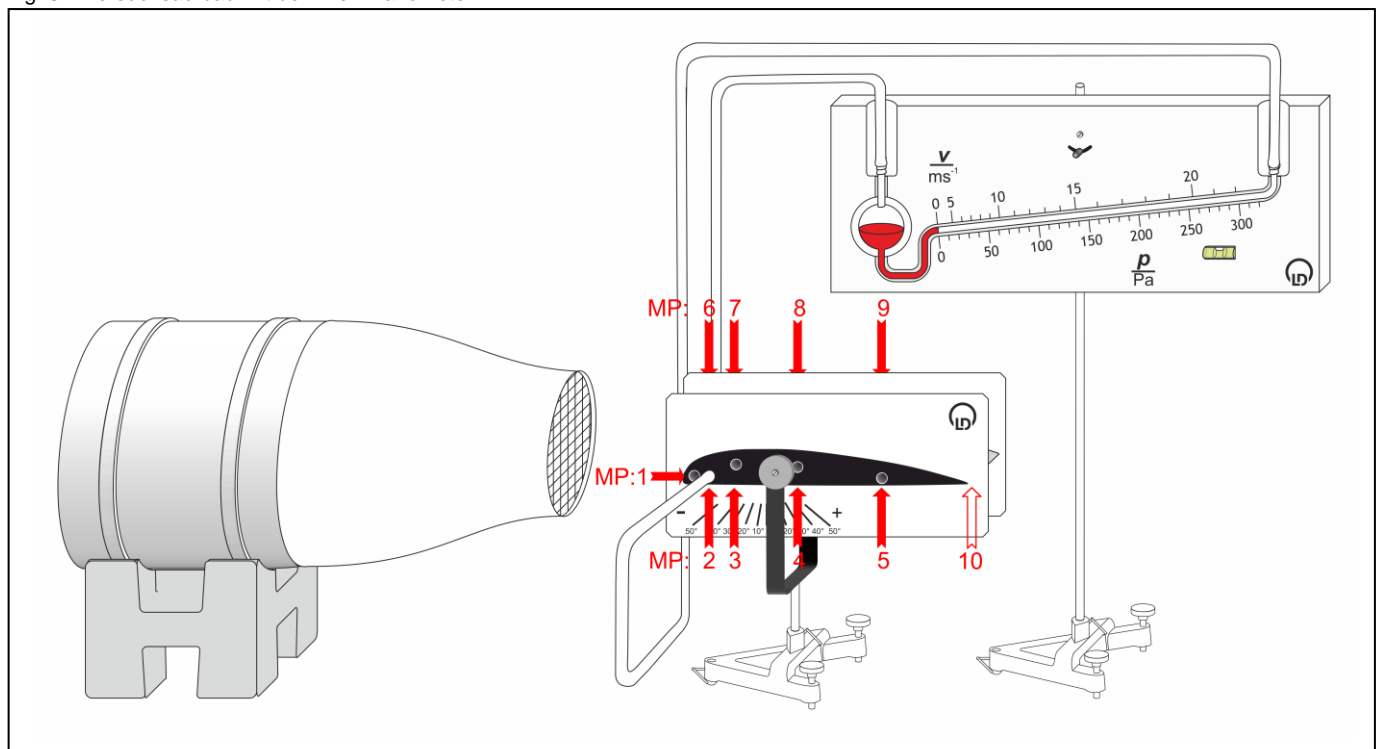
Aufbau

Geräte wie in Fig. 3 aufbauen. Saug- und Druckgebläse mit großer Düse 150 mm Ø bestücken. Die Druckseite des Saug- und Druckgebläses muss zum Tragflächenmodell zeigen. Vor der Saugseite und hinter dem Tragflächenmodell einen Freiraum von mindestens 1 m sicherstellen.

- Feinmanometer exakt horizontal ausrichten. Bei Bedarf Vorratsgefäß für Manometerflüssigkeit nachfüllen.
- Schlauch des Feinmanometers mit Schlauchanschluss für Überdruck (links) verbinden.
- Anderes Ende des Schlauchs in Anschlussnippel für Messstellen stecken und mit Messpunkt 6 des Tragflächenmodells verbinden (vgl. Fig. 3).
- Auf die gleiche Weise Schlauchanschluss für Unterdruck (rechts) des Feinmanometers mit Messpunkt 2 des Tragflächenmodells verbinden (vgl. Fig. 3).
- Tragflächenmodell ca. 10 cm mittig vor der Düse in Stativfuß, V-förmig, klein befestigen und Anstellwinkel $\alpha = +10^\circ$ einstellen.

Hinweis: Es ist entscheidend die Schlauchverbindungen nicht zu verwechseln, da der statische Druckunterschied Δp_s im Luftstrom z.T. negativ wird. Zusätzliche Informationen in den Gebrauchsanweisungen 373 13 und 373 10.

Fig. 3: 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 Windgeschwindigkeit v ca. 5,6 m/s erreicht. Dazu Schläuche kurzzeitig wie in Fig. 4 mit Drucksonde nach Prandtl verbinden und $\Delta p = 19$ Pa einstellen.

Hinweis: Detaillierte Informationen zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit v in P1.8.5.3.

- Tragflächenmodell auf Anstellwinkel $\alpha = +10^\circ$ justieren und ca. 10 cm vor der Düse aufstellen.
- Für Messpunkte 1 und 10 (vgl. Fig. 3) ist der Unterschied des statischen Drucks $\Delta p_s = 0$ Pa.
- Schläuche wieder mit Messpunkten 2 und 6 des Tragflächenmodells verbinden (wie in Fig. 3) und die zugehörige Profiltiefe z notieren:

MP	1	2; 6	3; 7	4; 8	5; 9	10
z	0%	15%	24%	43%	72%	100%

- Statischen Druckunterschied Δp_s an Messpunkten 2 und 6, 3 und 7, ... 5 und 9 am Feinmanometer ablesen.
- Um einen weiteren Anstellwinkel α aufzunehmen, neue Tabellenspalte anlegen und vorangegangene Schritte wiederholen.

b) Messung mit CASSY Lab 2

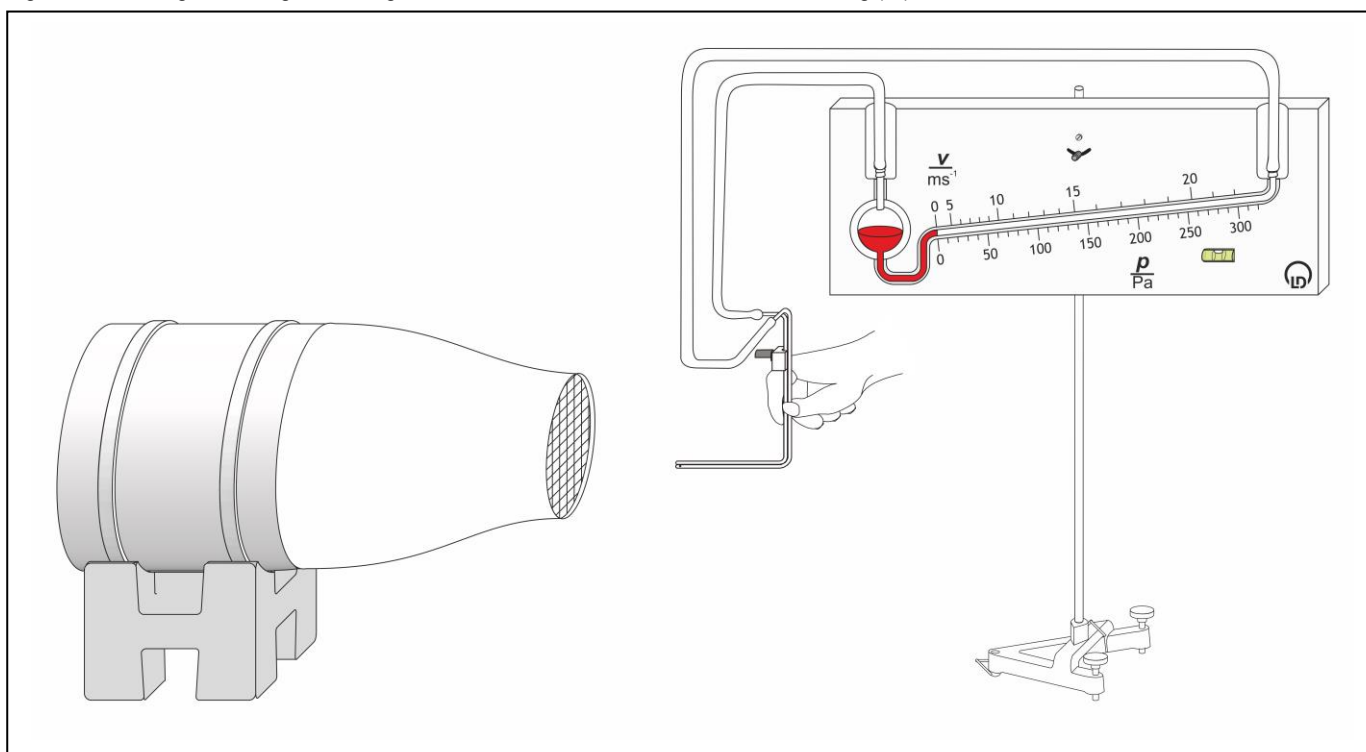
- Software CASSY Lab 2 öffnen oder installieren, wenn noch nicht vorhanden.
- [Einstellungen in CASSY Lab 2 laden](#).
- Saug- und Druckgebläse auf minimale Geschwindigkeit stellen (d.h.: linker Anschlag am Potentiometer-Stellknopf). Erst dann einschalten.
- Saug- und Druckgebläse langsam aufdrehen bis Windgeschwindigkeit v ca. 5,6 m/s erreicht. Dazu Schläuche kurzzeitig wie in Fig. 4 mit Drucksonde nach Prandtl verbinden und $\Delta p = 19$ Pa einstellen.

Hinweis: Detaillierte Informationen zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit v in P1.8.5.3.

- Tragflächenmodell auf Anstellwinkel $\alpha = +10^\circ$ justieren und ca. 10 cm vor der Düse aufstellen.
- Für Messpunkte 1 und 10 (vgl. Fig. 3) ist der Unterschied des statischen Drucks $\Delta p_s = 0$ Pa.
- Schläuche wieder mit Tragflächenmodell verbinden. Statischen Druckunterschied Δp_s an Messpunkten 2 und 6, 3 und 7, ... 5 und 9 messen und zusammen mit Profiltiefe z (vgl. Tabelle links) in Tabelle „ $p_s(z)$ [manu.]“ in CASSY Lab 2 eintragen.
- Um einen weiteren Anstellwinkel α aufzunehmen, Drop-down-Menü #1 ∇ klicken und die nächste Messreihe auswählen. Vorangegangene Schritte wiederholen.

Hinweis: Um mehr als die vorbereiteten Messreihen aufzunehmen, „Messung“ in der Menüleiste öffnen und \square „Neue Messreihe Anhängen“ auswählen. Tabelle „ $\Delta p_s(z)$ “ wählen und einmalig \odot klicken. Fenster \ast „Einstellungen“ öffnen und „ $\Delta p_s(z)$ “ im Untermenü „Darstellungen“ markieren. Schaltfläche „Neue Kurve hinzufügen“ klicken und „ $\Delta p_s\#6$ “ im Drop-down-Menü für „y-Achse“ wählen.

Fig. 4: Messung der Windgeschwindigkeit v mit Drucksonde nach Prandtl und Gleichung (IV).



Messbeispiel

Die Profiltiefe z entspricht den Messpositionen auf dem Tragflächenmodell. An der Vorderkante ($z = 0\%$) und Hinterkante ($z = 100\%$) ist der Druckunterschied $\Delta p_s = 0$ Pa.

	α °	20	10	0	-10	-20
MP	z	$\frac{\Delta p_s}{\text{Pa}}$				
1	0 %	0	0	0	0	0
6-2	15 %	27	16	4	-15	-14
7-3	24 %	27	20	12	-1	-4
8-4	43 %	10	7	5	2	-5
9-5	72 %	4	3	2	2	-4
10	100 %	0	0	0	0	0

Tab. 1: Statischer Druckunterschied Δp_s zwischen Ober- und Unterseite des Tragflächenmodells für sechs verschiedene Profiltiefen z und fünf Anstellwinkel α .

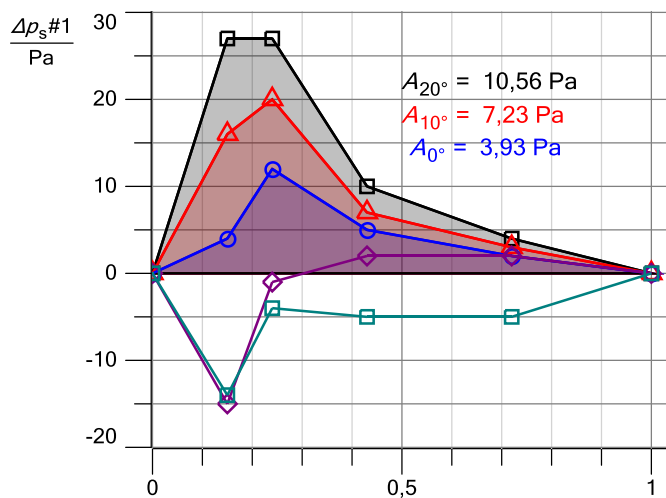


Fig. 5: Statischer Druckunterschied Δp_s als Funktion der Profiltiefe z .

Hinweis: Die Fläche unter dem Graphen von $\Delta p_s(z)$ kann automatisch mit CASSY Lab 2 bestimmt werden: Rechtsklick auf einen Messpunkt im $\Delta p_s(z)$ -Diagramm, „Integral berechnen“ wählen und „Fläche zur x-Achse“ klicken. Linke Maustaste über alle Messpunkte der Messreihe ziehen.

Sollte der erste oder letzte Messpunkt von anderen Messpunkten überdeckt werden, zunächst einen hervorstehenden Messpunkt wählen und das Integral zu einer Seite hin ziehen, dann den selben Messpunkt doppelklicken und das Integral zur anderen Seite hin ziehen.

Auswertung und Ergebnisse

Die Fläche A unter dem Graphen von $\Delta p_s(z)$ kann automatisch mit CASSY Lab 2 bestimmt oder manuell berechnet werden. Für Anstellwinkel $\alpha = +10^\circ$ gilt z.B.:

$$A_{10^\circ} = \int_0^{100\%} \Delta p_s(z) dz = 7,23 \text{ Pa} = 7,23 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Multiplizieren von A_{10° mit der Tragflächenbreite b und Tiefe z (in Metern, nicht %!), sowie Berücksichtigen des Anstellwinkels $\alpha = +10^\circ$, ergibt die theoretische Auftriebskraft F_T :

$$F_T = A_{10^\circ} \cdot b \cdot z \cdot \cos(\alpha)$$

Nach dieser – auf dem Bernoulli-Prinzip basierenden – Theorie produziert eine Tragfläche wie in P.1.8.7.1 (ähnliche Form, Breite $b = 0.14$ m, Tiefe $z = 0.22$ m) einen aerodynamischen Auftrieb von

$$F_T = 7,23 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,14 \text{ m} \cdot 0,22 \text{ m} \cdot \cos(10^\circ) = 0,2 \text{ N}$$

Die tatsächlich gemessene Auftriebskraft F_M für die Tragfläche in P.1.8.7.1 beträgt beim Anstellwinkel von $\alpha = +10^\circ$ jedoch **2,1 N** (vgl. Tab. 2):

$$F_M = 2,1 \text{ N}$$

$\frac{v}{\frac{\text{m}^{\circ}}{\text{s}}}$	5,6							
$\frac{\alpha}{^\circ}$	0	2	4	6	8	10	12	14
$\frac{F_M}{\text{N}}$	0,5	0,7	1,1	1,5	1,7	2,1	2,3	2,5

Tab. 2: Messergebnisse aus P.1.8.7.1: Gemessener aerodynamischer Auftrieb F_M und Anstellwinkel α bei Strömungsgeschwindigkeit $v = 5,6$ m/s.

Die Differenz des statischen Drucks Δp_s erklärt nur ca. 10% des gemessenen Auftriebs!

Zusatzinformation

Oft wird in diesem Zusammenhang auch fälschlicherweise das Zusammentreffen der beiden Luftströme an der Hinterkante der Tragfläche und der längere Weg der Luft als Ursache für den niedrigeren Druck auf der Tragflächenoberseite angegeben. Bereits in den frühen Tagen der Luftfahrt veröffentlichte Alexander Lippisch jedoch Bilder von gepulsten Rauchfahnen, welche zeigen, dass die beiden Luftströme nicht wieder zusammentreffen:

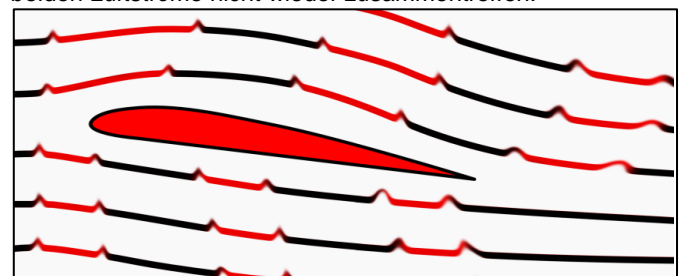


Fig. 6: Gepulste Rauchfahnen um Tragflächenmodell, schematisch.