

## Druckverlauf an einem Tragflächenprofil

– Messung mit Drucksensor und CASSY

### 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.

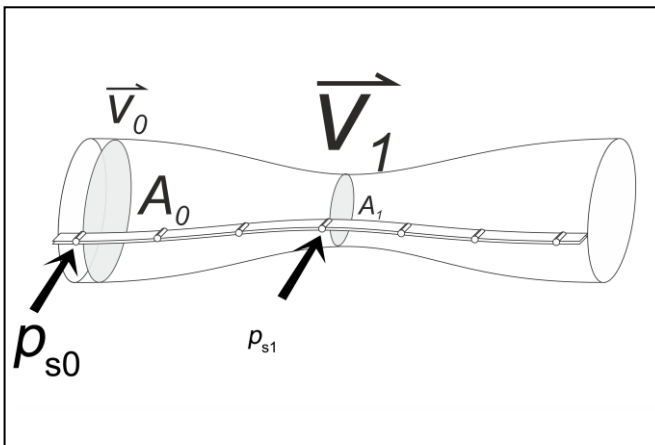
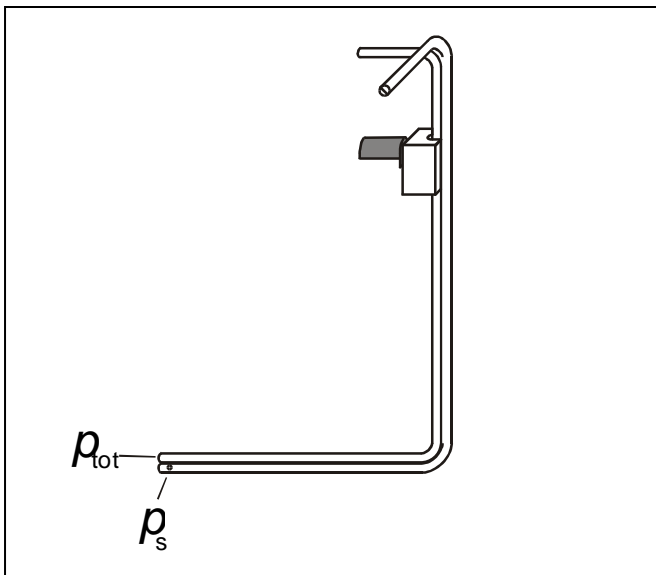


Fig. 1: Bernoulli-Prinzip: Querschnittsfläche  $A$ , Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , statischer Druck  $p_s$ . Schriftgröße proportional zur physikalischen Größe.

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  $\Delta p_s$  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  $\Delta p_s$ , 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 Drucksensor. 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. P1.8.5.4 sowie P1.8.7.4 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 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

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.

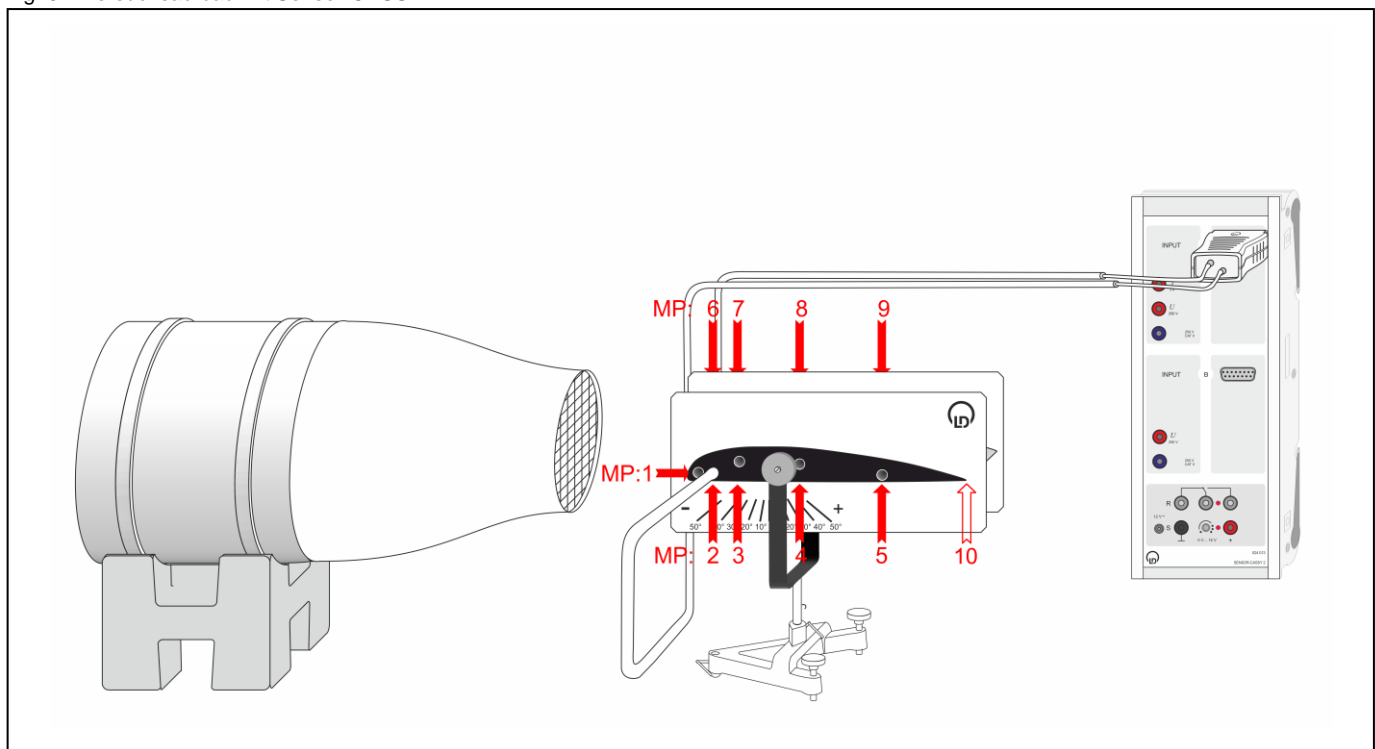
**Aufbau**

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.

- Drucksensor S, ±70 hPa in Eingang A von Sensor-CASSY 2 (Fig. 3) oder Mobile-CASSY (Fig. 6) stecken.
- 3-mm-Schlauch aus Druckanschluss  $p_1$  (oben) von Drucksensor S mit 5-mm-Schlauch (liegt Drucksonde nach Prandtl bei) verbinden.
- Anderes Ende des 5-mm-Schlauchs in Anschlussnippel für Messstellen stecken und mit Messpunkt 6 (für Unterseite) des Tragflächenmodells verbinden (vgl. Fig 3).
- Auf die gleiche Weise Druckanschluss  $p_2$  (unten) von Drucksensor S mit Messpunkt 2 (für Oberseite) 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  $\Delta p_s$  im Luftstrom z.T. negativ wird. Zusätzliche Informationen in den Gebrauchsanweisungen 373 13 und 524 066.*

Fig. 3: Versuchsaufbau mit Sensor-CASSY 2.

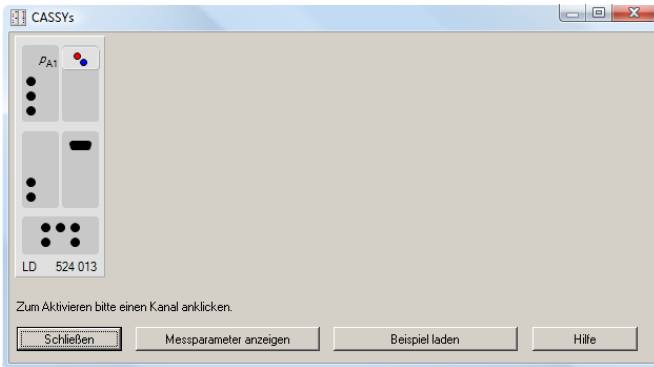


**Durchführung**

- 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 von Sensor-CASSY 2 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<sub>A1</sub>“ markieren.
- 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 P1.8.5.6.*

- 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 statische Druckunterschied  $\Delta p_s = 0$  Pa. Um diese Werte in CASSY Lab 2 einzutragen, Schläuche aneinander halten und klicken (evtl. zusätzlich mit nullen).
- Schläuche wieder mit Messpunkten 2 und 6 des Tragflächenmodells verbinden (wie in Fig. 3) und die zugehörige Profiltiefe z am Schieberegler für Kanal z einstellen:

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

- Statischen Druckunterschied  $\Delta p_s$  an Messpunkten 2 und 6, 3 und 7, ... 5 und 9 mit Klick auf messen.
- Um einen weiteren Anstellwinkel  $\alpha$  aufzunehmen, Drop-down-Menü #1 klicken und die nächste Messreihe auswählen.

*Hinweis: Die Schaltfläche erscheint im Fenster „Einstellungen“ , wenn „Relativdruck p<sub>A1</sub>“ 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.

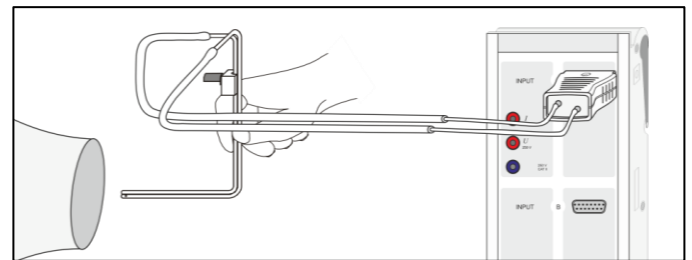


Fig. 4: Messung der Windgeschwindigkeit v mit Drucksonde nach Prandtl und Gleichung (IV).

- 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 P1.8.5.6.*

- Tragflächenmodell auf Anstellwinkel  $\alpha = +10^\circ$  justieren und ca. 10 cm vor der Düse aufstellen.
- [Einstellungen in CASSY Lab 2 laden](#).
- Für Messpunkte 1 und 10 (vgl. Fig. 3) ist der statische Druckunterschied  $\Delta p_s = 0$  Pa.
- Statischen Druckunterschied  $\Delta p_s$  an Messpunkten 2 und 6, 3 und 7, ... 5 und 9 messen und zusammen mit Profiltiefe z (vgl. Tabelle links) in Tabelle „p<sub>s</sub>(z) [manu.]“ eintragen.
- Um einen weiteren Anstellwinkel  $\alpha$  aufzunehmen, Drop-down-Menü #1 klicken und die nächste Messreihe auswählen.

*Hinweis: Um mehr als die vorbereiteten Messreihen aufzunehmen, „Messung“ in der Menüleiste öffnen und „Neue Messreihe Anhängen“ auswählen. Tabelle „Δp<sub>s</sub>(z)“ wählen und einmalig klicken. Fenster „Einstellungen“ öffnen und „Δp<sub>s</sub>(z)“ im Untermenü „Darstellungen“ markieren. Schaltfläche „Neue Kurve hinzufügen“ klicken und „Δp<sub>s</sub>#6“ im Drop-down-Menü für „y-Achse“ wählen.*

**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.

	$\alpha$ °	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  $\Delta p_s$  zwischen Ober- und Unterseite des Tragflächenmodells für sechs verschiedene Profiltiefen  $z$  und fünf Anstellwinkel  $\alpha$ .

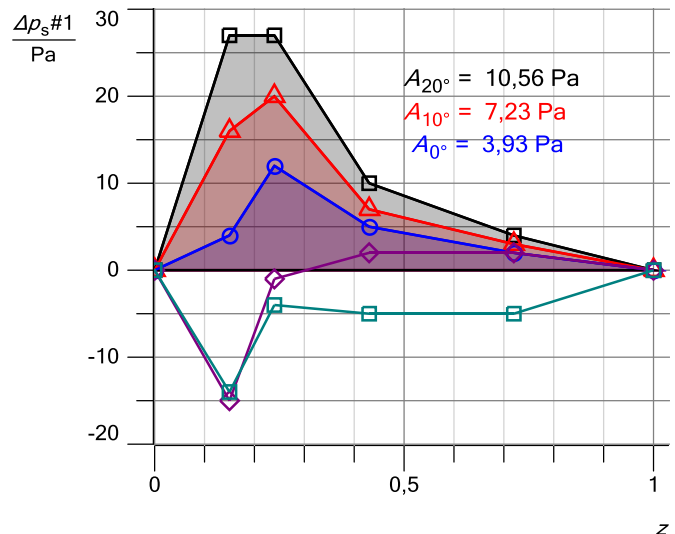
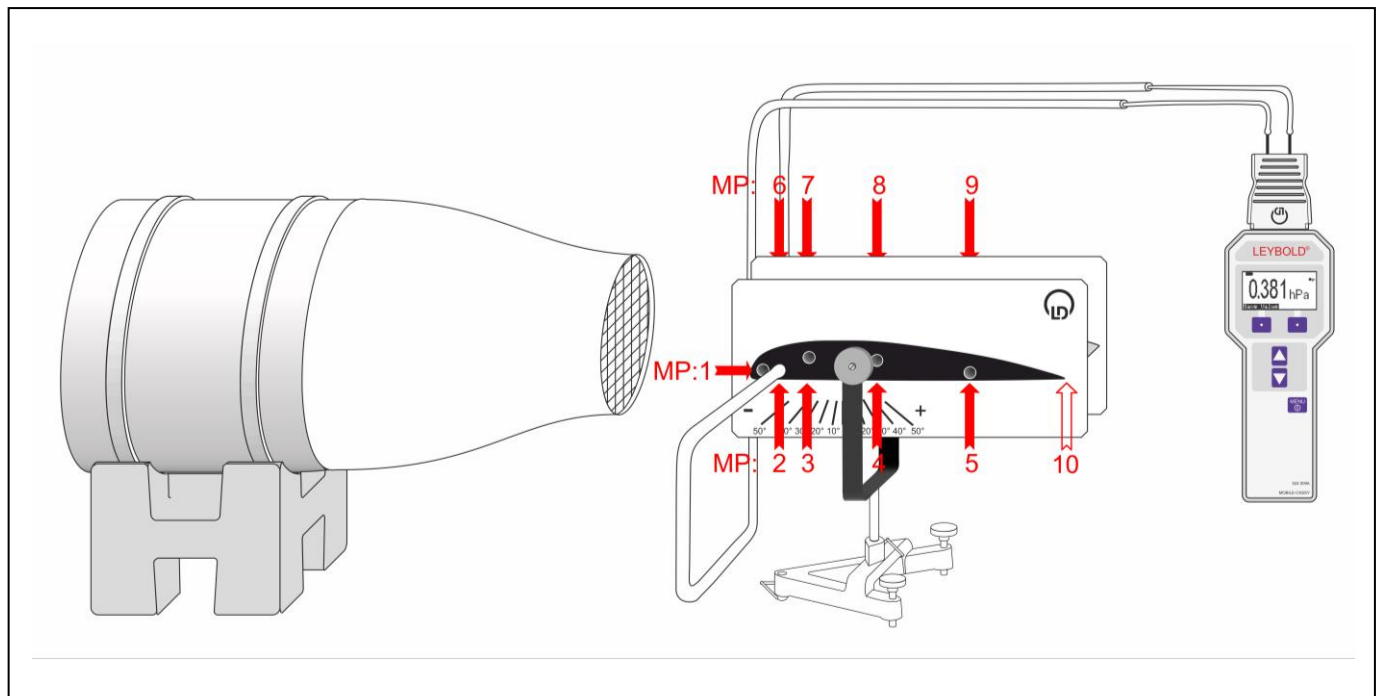


Fig. 5: Statischer Druckunterschied  $\Delta p_s$  als Funktion der Profiltiefe  $z$ .

*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,  $\int dx$  „Integral berechnen“ wählen und  $\int$  „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.*

Fig. 6: Versuchsaufbau mit Mobile-CASSY.



**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  $A_{10^\circ}$  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  $b = 0.14 \text{ m}$ , Tiefe  $z = 0.22 \text{ m}$ ) 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 P1.8.7.1. Gemessener aerodynamischer Auftrieb  $F_M$  und Anstellwinkel  $\alpha$  bei Strömungsgeschwindigkeit  $v = 5,6 \text{ m/s}$ .

Die Differenz des statischen Drucks  $\Delta p_s$  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:

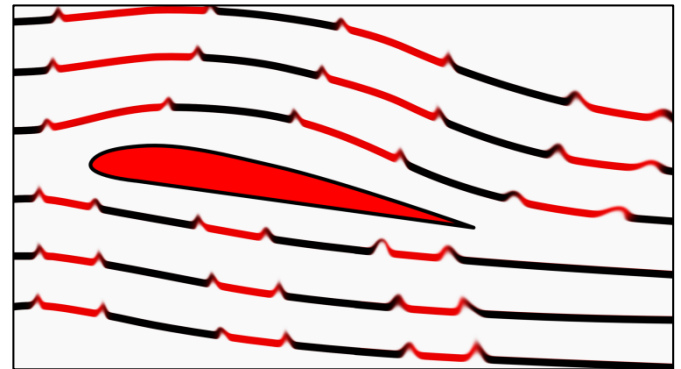


Fig. 7: Gepulste Rauchfahnen um Tragflächenmodell, schematisch.