

# **M7 - Windkanal**

Julia Mariella Wiest

Gruppe A06

29.11.2024

---

*Mit der Abgabe dieses Protokolls wird bestätigt, dass es kein Plagiat ist. Falls es dennoch eindeutig als Plagiat erkannt werden sollte, ist bekannt, dass das einen Punktabzug von 20 Punkten zur Folge, ohne Möglichkeit der Nachbearbeitung, hat. Diese Bewertung wird ausnahmslos zur Gesamtnote im Anfängerpraktikum beitragen.*



# 1 Physikalische Grundlagen

Die nachstehenden Versuche im Windkanal wurden mit dem Ziel durchgeführt, die Kontinuitätsgleichung zu überprüfen und die Widerstands- und Auftriebsbeiwerte für einen Tragflügel beziehungsweise für weitere zu untersuchende Objekte zu bestimmen.

Fließt ein inkompressibles Fluid durch ein Rohr mit veränderlichen Querschnitt, wie in Abbildung 1.1 zu sehen, so gilt für eine reibungsfreie, nichtturbulente Strömung die Kontinuitätsgleichung

$$A_1 v_1 = A_2 v_2.$$

Das heißt, dass sich die Strömungsgeschwindigkeit indirekt proportional zur Querschnittsfläche verhält. Dies gilt beispielsweise für Luft bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten (Tipler und Mosca o. D., S. 367), (o.V. WiSe 2024).

Der im Versuch verwendete Windkanal stellt eine horizontal ausgerichtete Stromröhre dar. Dadurch werden wirkende äußere Kräfte ausgeschaltet und die Bernoulli-Gleichung kann in einer vereinfachteren Form angewendet werden:

$$p_0 = p + \frac{\rho}{2} v^2.$$

So besteht diese nur noch aus dem Gesamtdruck  $p_0$ , dem statischen Druck  $p$  und dem Staudruck, auch hydrodynamischer Druck genannt,  $\frac{\rho}{2} v^2$ .

Diese Drücke können über verschiedene Sonden gemessen werden. Ein sogenanntes Pitot-Rohr kann den Gesamtdruck messen, wobei ein Prandtl-Rohr den Staudruck ermittelt. Im nachfolgend beschriebenen Versuch wurde ein Prandtl-Rohr verwendet, sodass sich die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  über folgende Formel berechnen lässt:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}}.$$

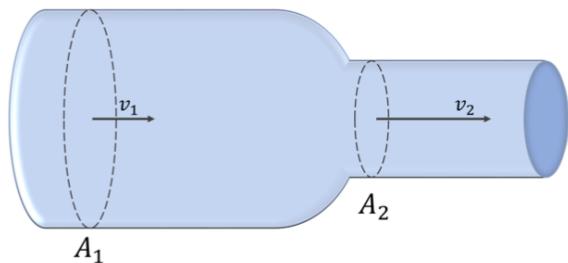


Abb. 1.1: Veranschaulichung der Kontinuitätsgleichung  
(o.V. WiSe 2024).

Durch jedes Fluid entstehen stets Reibungen an den Körperoberflächen, was zu einer Veränderung der Strömungssymmetrie führt. Somit kommt es zu einer Asymmetrie vor und hinter dem umströmten Körper, sodass zusätzlich auftretende Widerstände wirken. Der hierdurch entstehende Gesamtwiderstand kann folgendermaßen berechnet werden:

$$F_W = c_W \frac{\rho}{2} v^2 A,$$

wobei  $c_W$  der Widerstandsbeiwert,  $\frac{\rho}{2} v^2$  die kinetische Energie pro Volumen und  $A$  die angeströmte Fläche ist (o.V. WiSe 2024).

Der soeben genannte Widerstandsbeiwert ist dabei von der Gestalt und Oberflächenrauigkeit des Körpers abhängig, aber auch die Reynoldszahl und der Turbulenzgrad bei schnellen Geschwindigkeiten im Windkanal beeinflussen den Faktor beträchtlich (Meschede o.D., S. 126). Bei Stromlinienkörpern beispielsweise ist der Widerstandsbeiwert sehr klein, da kein nennenswerter Druckwiderstand am Körper zustandekommt. Bei Tragflügelmodellen jedoch ist der Widerstandsbeiwert  $c_W$  und die Auftriebsziffer  $c_A$  von großer Relevanz. Die Auftriebskraft eines Tragflügels wird ganz ähnlich zur Widerstandskraft  $F_W$  berechnet:

$$F_A = c_A \frac{\rho}{2} v^2 S.$$

Im Tragflügelmodell wird statt der Fläche  $A$  die Fläche des Tragflügels  $S$  in die Formel eingesetzt (o.V. WiSe 2024).

Verknüpft man beide Beiwerte  $c_W$  und  $c_A$ , so erhält man die Gleitzahl

$$\varepsilon = \frac{F_A}{F_W} = \frac{c_A}{c_W}.$$

Dabei sind die Auftriebsziffer und der Widerstandsbeiwert beide Funktionen des Anstellwinkels und können in einem sogenannten Polardiagramm (Abbildung 1.2) dargestellt werden.

Durch das Einzeichnen einer Ursprungsgeraden, welche sich an den Graphen der  $c_A$ - und  $c_W$ -Werte anschmiegt, lässt sich der ideale Anstellwinkel für den Tragflügel ermitteln (o.V. WiSe 2024).

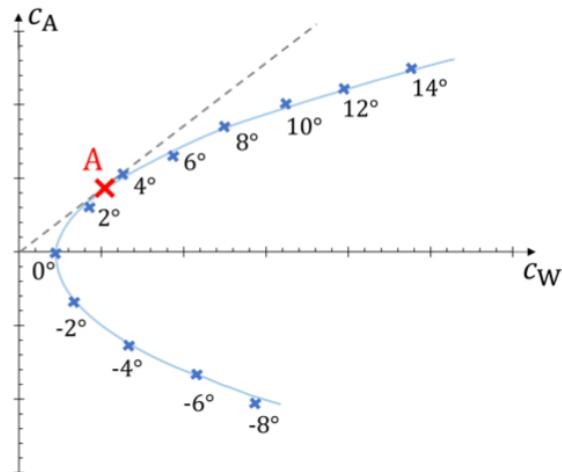


Abb. 1.2: Polardiagramm: Auftragung von  $c_A$  über  $c_W$  für variierende Anstellwinkel (o.V. WiSe 2024).

## 2 Windkanal

### 2.1 Versuchsaufbau- und durchführung

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Gebläse, an welches ein Windkanal angebracht ist, welcher in einem großen Trichter endet, wie in Abbildung 2.1 zu sehen. Die Bodenplatte des Windkanals ist über leicht lösbare Schrauben austauschbar, sodass für den ersten Teil des Versuches eine Bernoulli-Rampe in den Windkanal eingefügt werden kann. Die verwendete Bernoulli-Rampe weist sechs verschiedene Abstandsmarkierungen zwischen  $0,0150\text{ m}^2$  und  $0,0200\text{ m}^2$  auf, woran die Fläche  $A$  abgelesen werden kann. Das mit dem Feinmanometer verbundene Prandl-Rohr kann an einem Messwagen angebracht werden, welcher sich auf einer Schiene an der Oberseite des Windkanals nach vorne und hinten bewegen kann. Die Schienenführung selbst hat eine längliche Öffnung, sodass über eine kleine gebogene Metallstange (ähnlich einem Inbusschlüssel) Gegenstände in den Windkanal gehängt werden können. Ebenso wird gleichermaßen das Prandl-Rohr zur Messung des Staudrucks in den Windkanal eingeführt. Das Prandl-Rohr ist über dünne Schläuche mit dem Feinmanometer verbunden.

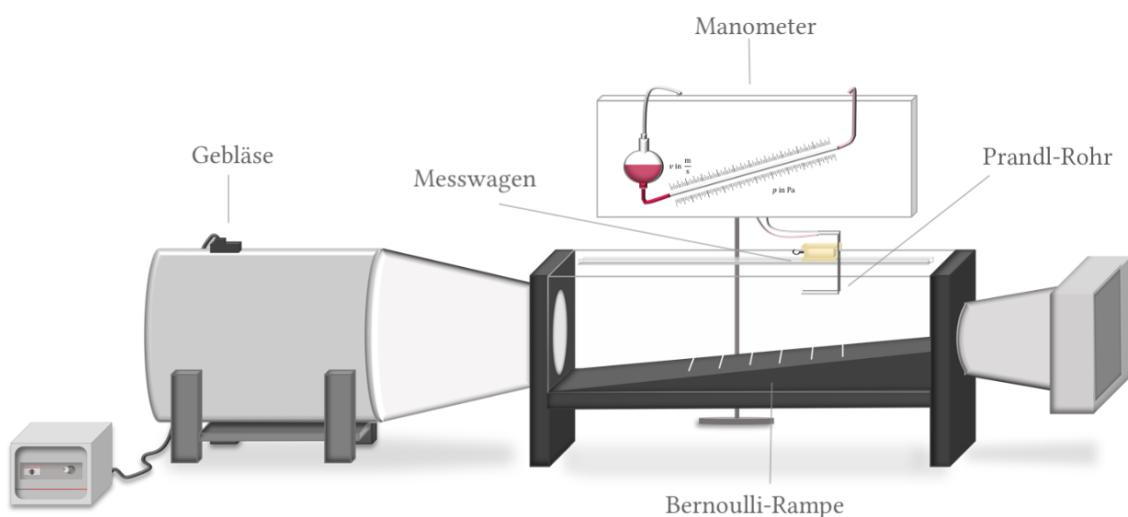


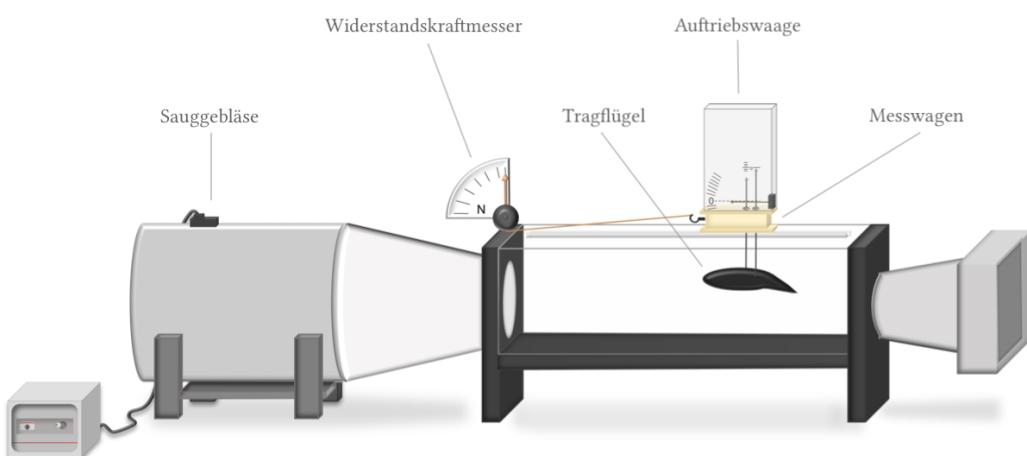
Abb. 2.1: Versuchsaufbau Windkanal mit Bernoulli-Rampe und Prandl-Rohr (o.V. WiSe 2024).

Das Manometer besteht aus einer Platte, in welche ein rundes Flüssigkeitsgefäß eingelassen ist. Dieses Flüssigkeitsgefäß mündet in einem dünnen, leicht aufwärts gerichteten Glasrohr (wie bei einem Thermometer), an welchem oberhalb die Skala für die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  in  $\text{m s}^{-1}$  und unterhalb für den Staudruck  $p$  in Pa angezeichnet ist. Bevor mit den Messungen begonnen werden kann, muss das Manometer so gekippt werden, dass die Flüssigkeit einmal

komplett durch das Messrohr gelaufen ist. Durch das nun mit Messflüssigkeit benetzte Rohr ist sichergestellt, dass die Flüssigkeit während der Messungen leichter durch das Glasrohr laufen kann.

Zur Durchführung des ersten Teilversuches wird nun das Prandl-Rohr jeweils an die sechs verschiedenen Markierungen der Bernoulli-Rampe mit dem Messwagen gehalten und am Manometer die Windgeschwindigkeit  $v$  und der Staudruck  $p$  abgelesen, wobei die zu Beginn am Gebläse eingestellte Windgeschwindigkeit während des Versuches dort nicht mehr verstellt, also konstant gehalten wird.

Für den zweiten Teilversuch wird nun die Bernoulli-Rampe durch eine glatte Bodenplatte ersetzt (vgl. Abbildung 2.2). Am Messwagen wird von unten anhand zweier beweglicher paralleler Stäbe ein Tragflügel angebracht. Auf dem Messwagen wird zugleich eine Auftriebswaage installiert an welcher die Auftriebskraft abgelesen werden kann. Über zwei seitlich angebrachte Schrauben kann so der rechte Stab des Tragflügels bei  $0^\circ$  fixiert und der linke Stab anhand einer Justierskala zwischen  $-8^\circ$  und  $14^\circ$  variiert werden. Dadurch können zwölf verschiedene Anstellwinkel des Tragflügels gemessen werden. Der Messwagen selbst wird über eine Schnur an einem Widerstandskraftmesser angebracht. Das Gebläse ist so einzustellen, dass bei maximalem Anstellwinkel des Tragflügels die Widerstands- und Auftriebskraft bei beiden Kraftmessern im Rahmen des Messbereichs bleibt. Für die zwölf verschiedenen Winkeleinstellungen werden nun jeweils die Werte für die Widerstandskraft  $F_W$  und die Auftriebskraft  $F_A$  abgelesen. Die Fläche des Tragflügelmodells kann dadurch bestimmt werden, indem die Länge  $l$  und die Breite  $b$  des Flügels abgemessen werden. Die nun in diesem Versuchsaufbau vom Gebläse erzeugte Windgeschwindigkeit  $v$  kann über den mit dem Prandl-Rohr gemessenen Staudruck  $p$  ermittelt werden.



**Abb. 2.2:** Versuchsaufbau Windkanal mit Tragflügel (o.V. WiSe 2024).

Im dritten Teilversuch werden nun verschiedene Probekörper im Windkanal auf ihre Luftwiderstände untersucht. Dafür werden die bereitliegenden Körper auf die am Messwagen angebrachte gebogene Metallstange gesteckt, wie in Abbildung 2.3 zu sehen. Der Messwagen bleibt weiterhin über eine Schnur mit dem Widerstandskraftmesser verbunden. Es standen folgende zu untersuchende Körper zur Verfügung: Kugel, Halbkugelschale, Tropfen, Scheiben in drei verschiedenen Größen (klein, mittel, groß) und ein Spielzeugauto mit dazugehöriger Halterung. Für alle Figuren wurde dieselbe Windgeschwindigkeit, welche wiederum mit dem Prandl-Rohr gemessen wurde, im Windkanal gewählt. Um die vom Wind angeströmte Fläche der Probekörper zu bestimmen, wurde bei den rotationssymmetrischen Körpern der Durchmesser gemessen. Beim Spielzeugauto wurden die Maße der Länge und Breite abgenommen.



**Abb. 2.3:** Versuchsaufbau Windkanal für verschiedene Probekörper (o.V. WiSe 2024).

Für den letzten Teilversuch bleibt der Aufbau des dritten Teilversuches bestehen, mit dem Unterschied, dass weitere Messungen nun nur für die Halbkugelschale vorgenommen werden. Im Folgenden werden nochmals sieben Messungen mit unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten  $v$  vorgenommen. Die Strömungsgeschwindigkeit wird gleichermaßen wieder mit dem Prandl-Rohr bestimmt.

## 2.2 Auswertung der Messergebnisse

Auf Grundlage der im vorherigen Kapitel beschriebenen Versuchsdurchführung werden die damit erlangten Messergebnisse nun ausgewertet.

### Überprüfung der Kontinuitätsgleichung

Zunächst soll mit den Messergebnissen aus dem ersten Teil der Versuchsdurchführung die Kontinuitätsgleichung

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

überprüft werden.

Wegen der im Versuch verwendeten Bernoulli-Rampe durchläuft die vom Gebläse verströmte Luft verschiedene große Flächen. Diese Flächen sind auf der eingebauten Bernoulli-Rampe durch Markierungen alle 4 cm vermerkt, was einer Änderung der durchströmten Fläche von  $0,001 \text{ m}^2$  entspricht. Bei der Positionierung des Prandl-Rohrs wird von einem Fehler von  $\Delta x = 15 \text{ cm}$  ausgegangen. Damit ergibt sich insgesamt ein Messfehler von

$$\Delta A = 0,001 \text{ m}^2 \cdot 0,0015 \text{ m}^2 = 0,000\,0015 \text{ m}^2.$$

Während des Versuches wurden am Feinmanometer sowohl der Staudruck  $p$  als auch die Windgeschwindigkeit  $v$  abgelesen. Die Geschwindigkeit lässt sich jedoch ebenso nochmals mit der Formel

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \pm \left( \sqrt{\frac{1}{2\rho p}} \cdot \Delta p \right)$$

bestätigen.

Um die obige Formel anwenden zu können, muss zunächst der Umgebungsdruck

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T} = 1,2928 \text{ Pa} \cdot \frac{273,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}} = 1,205 \text{ Pa}$$

berechnet werden. Hierfür wird die Dichte von Luft mit  $\rho_0 = 1,2928 \text{ Pa}$ , die Temperatur  $T_0 = 273,15 \text{ K} \hat{=} 0^\circ\text{C}$  und die gemessene Raumtemperatur  $T = 293,15 \text{ K} \hat{=} 20^\circ\text{C}$  verwendet.

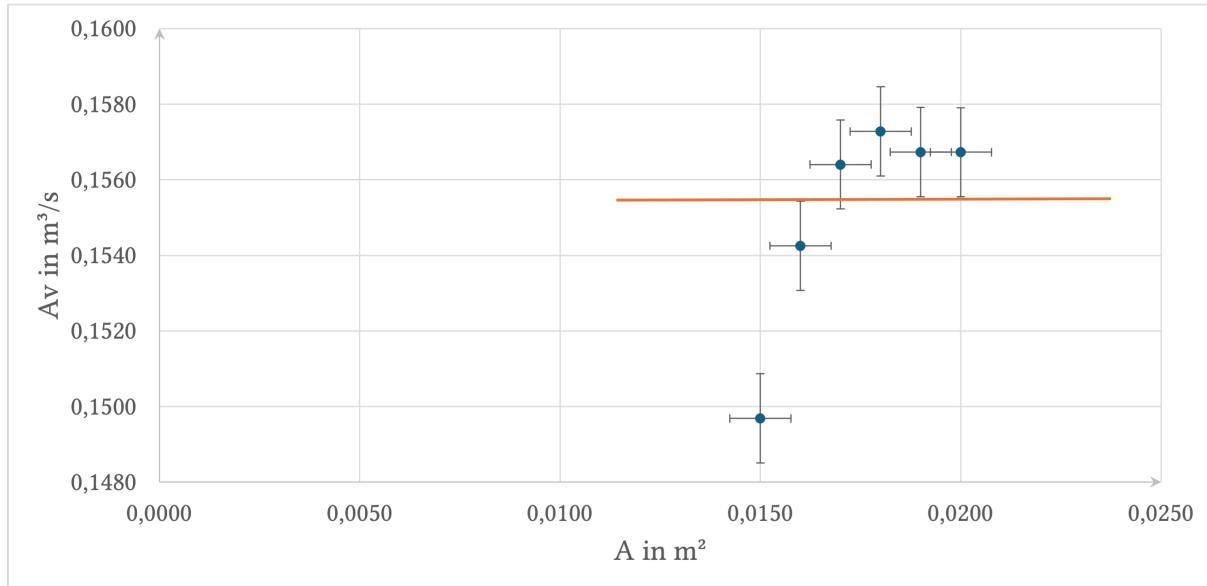
Damit die Kontinuitätsgleichung grafisch überprüft werden kann, indem die Fläche  $A$  gegen den Volumenstrom  $A \cdot v$  aufgetragen wird, werden anschließend die sechs Flächenwerte mit den berechneten Windgeschwindigkeiten multipliziert.

Alle Ergebnisse sind in folgender Tabelle 2.1 zusammengefasst. Genaue Berechnungen und alle verwendeten Werte sind hierfür im Anhang 3 bei Tabelle 3.1 zu finden.

$A$ in $\text{m}^2$	$p \pm 2,5$ in Pa	$v_{\text{gem}}$ in $\text{m s}^{-1}$	$v_{\text{ber}}$ in $\text{m s}^{-1}$	$A \cdot v$ in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
0,0150	60	10,0	$9,9792 \pm 0,2079$	$0,1497 \pm 0,0031$
0,0160	56	9,6	$9,6409 \pm 0,2152$	$0,1543 \pm 0,0035$
0,0170	51	9,1	$9,2004 \pm 0,2255$	$0,1564 \pm 0,0038$
0,0180	46	8,8	$8,7378 \pm 0,2374$	$0,1573 \pm 0,0043$
0,0190	41	8,1	$8,2492 \pm 0,2515$	$0,1567 \pm 0,0048$
0,0200	37	7,8	$7,8365 \pm 0,2647$	$0,1567 \pm 0,0053$

**Tabelle 2.1:** Auswertung der Messergebnisse im Windkanal mit Bernoulli-Rampe.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die abgelesenen Geschwindigkeitswerte am Feinmanometer nur geringfügig von den berechneten abweichen.

**Abb. 2.4:** Grafische Darstellung der Fläche  $A$  gegen den Volumenstrom  $A \cdot v$  zur Überprüfung der Kontinuitätsgleichung.

Nach Abbildung 2.4 lässt sich die Kontinuitätsgleichung nicht bestätigen, denn im Idealfall sollte das Produkt aus Fläche und Stromgeschwindigkeit konstant auf einer Geraden, hier in orange abgebildet, liegen. Die erste Messung bei  $A = 0,0150 \text{ m}^2$  liegt vollkommen außerhalb der Erwartungen. Alle anderen gemessenen Werte liegen relativ genau beieinander, sodass sich diese ungefähr im Bereich ihrer Messfehler mit einer konstanten Geraden abbilden lassen. Der kleine Ausreißer bei  $A = 0,0180 \text{ m}^2$  lässt sich hierbei besser vernachlässigen, als der bei  $A = 0,0150 \text{ m}^2$ .

Da sich die Kontinuitätsgleichung mit den gemessenen Werten nicht völlig bestätigen lässt, könnte an folgenden möglichen Fehlerquellen liegen:

- Der im Versuch benutzte Windkanal war durch den Schlitz an der Oberseite, durch welchen das Prandl-Rohr in den Windkanal eingeführt wurde, nicht ganz dicht. Dadurch kommt es zu einer kontinuierlichen Luftentweichung, was die Ergebnisse verfälscht und

zudem die Bedingung, dass die Kontinuitätsgleichung in einem geschlossenen Kanal gilt, verletzt.

- Eventuell wurde auch der entstandene Flächenfehler durch die Positionierung des Prandl-Rohrs im Windkanal an der entsprechenden Markierung der Bernoulli-Rampe als zu klein angenommen. Denn der doch recht große Abstand zwischen dem Prandl-Rohr und der Bernoulli-Rampe macht eine genaue Positionierung nach Augenmaß schwieriger.
- Ein Ablesefehler am Feinmanometer beim Staudruck  $p$  und der Windgeschwindigkeit  $v$  wird allerdings ausgeschlossen, da die über die obige Formel zur Berechnung der Geschwindigkeit berechneten Werte nahezu mit den gemessenen Geschwindigkeiten übereinstimmen.

## Bestimmung der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte $c_W$ und $c_A$ für den Tragflügel

Nachdem Umbau des Windkanals wird nun ein Tragflügelmodell in zwölf verschiedenen Anstellwinkelpositionen untersucht. Zur Ermittlung der Windgeschwindigkeit wird der über den Versuch konstant gehaltene Staudruck  $p = 15 \text{ Pa}$  mit  $\Delta p = 2,5 \text{ Pa}$  mit dem Prandl-Rohr gemessen und wird wie im obigen ersten Teilversuch mit der Formel

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \pm \left( \sqrt{\frac{1}{2\rho p}} \cdot \Delta p \right) = (4,99 \pm 0,42) \text{ m s}^{-1}$$

ermittelt, wobei wiederum der Umgebungsdruck  $\rho = 1,205 \text{ Pa}$  verwendet wurde.

Die Flügelfläche des im Versuch benutzten Tragflügels ergibt sich durch

$$S = l \cdot b = 0,225 \text{ m}^2 \cdot 0,145 \text{ m}^2 = 0,032625 \text{ m}^2.$$

Bei der Messung der Länge  $l$  und Breite  $b$  wurden die Abrundungen des Tragflügels vernachlässigt, wobei ein Messfehler von  $\Delta l = \Delta b = 0,003 \text{ m}$  angenommen wird.

Mit den vorliegenden Werten lässt sich nun der Widerstandsbeiwert

$$c_W = \frac{2 \cdot F_W}{\rho v^2 S} \pm \left( \frac{2}{\rho v^2 S} \Delta F_W + \frac{4F_W}{\rho v^3 S} \Delta v + \frac{2F_W}{\rho v^2 b l^2} \Delta l + \frac{2F_W}{\rho v^2 b^2 l} \Delta b \right),$$

und der Auftriebskraftbeiwert

$$c_A = \frac{2 \cdot F_A}{\rho v^2 S} \pm \left( \frac{2}{\rho v^2 S} \Delta F_W + \frac{4F_A}{\rho v^3 S} \Delta v + \frac{2F_A}{\rho v^2 b l^2} \Delta l + \frac{2F_A}{\rho v^2 b^2 l} \Delta b \right),$$

berechnen.

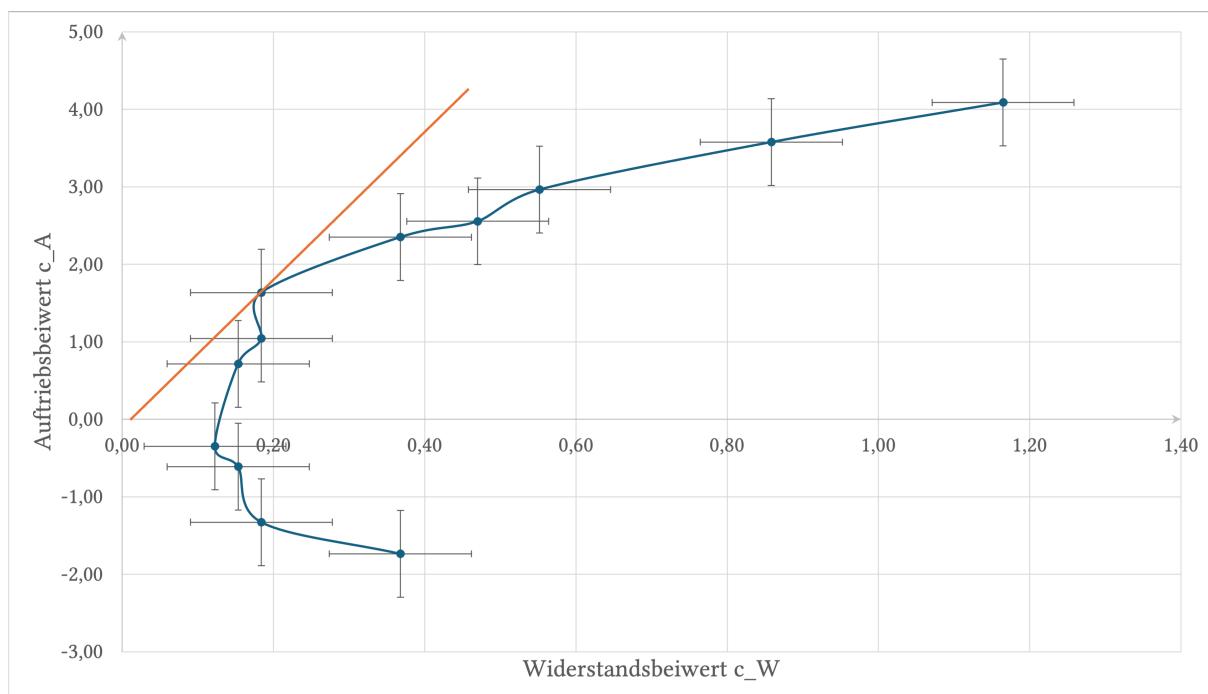
Hierzu werden für die gemessene Widerstandskraft  $F_W$  ein Fehler von  $\Delta F_W = 0,005 \text{ N}$  und für die gemessene Auftriebskraft ein Fehler von  $\Delta F_A = 0,100 \text{ N}$  angenommen.

Alle hiermit ermittelten Ergebnisse sind Tabelle 2.2 zu entnehmen, wobei genauere Berechnungen wieder im Anhang 3 bei Tabelle 3.2 zu finden sind.

$\varphi$	$F_A$ in N	$F_W$ in N	$c_A$	$c_W$
-8	-0,85	0,180	$-1,7369 \pm -0,1442$	$0,3678 \pm 0,0840$
-6	-0,65	0,090	$-1,3282 \pm -0,0622$	$0,1839 \pm 0,0471$
-4	-0,30	0,075	$-0,6130 \pm -0,0813$	$0,1533 \pm 0,0410$
-2	-0,17	0,060	$-0,3474 \pm 0,1346$	$0,1226 \pm 0,0348$
0	0,35	0,075	$0,7152 \pm 0,3479$	$0,1533 \pm 0,0410$
2	0,51	0,090	$1,0421 \pm 0,4135$	$0,1839 \pm 0,0471$
4	0,80	0,090	$1,6347 \pm 0,5324$	$0,1839 \pm 0,0471$
6	1,15	0,180	$2,3499 \pm 0,6750$	$0,3678 \pm 0,0840$
8	1,25	0,230	$2,5543 \pm 0,7170$	$0,4700 \pm 0,1045$
10	1,45	0,270	$2,9630 \pm 0,7990$	$0,5517 \pm 0,1209$
12	1,75	0,420	$3,5760 \pm 0,9220$	$0,8582 \pm 0,1825$
14	2,00	0,570	$4,0868 \pm 1,0245$	$1,1648 \pm 0,2440$

**Tabelle 2.2:** Messergebnisse der Tragfläche im Windkanal.

Trägt man den Auftriebsbeiwert  $c_A$  gegen den Widerstandsbeiwert  $c_W$  in einem Polardiagramm auf, so kann zur Ermittlung des maximalen Auftriebwinkels eine Ursprungsgerade an den Graphen angelegt werden.

**Abb. 2.5:** Polardiagramm der  $c_A$ - und  $c_W$ -Werte in Abhängigkeit vom Winkel  $\varphi$ .

Anhand Abbildung 2.5 lässt sich so der ideale Anstellwinkel bei  $4^\circ$  mit Werten für  $c_A = 1,6347$  und  $c_W = 0,1839$  ablesen. Daraus lässt sich ebenfalls die Gleitzahl

$$\varepsilon = \frac{c_W}{c_A} = \frac{F_W}{F_A} = \frac{0,1839}{1,6347} = 0,1125$$

ermitteln.

Die Knicke im Graphen in Abbildung 2.5 könnten aus folgenden Fehlerquellen stammen:

- Wie bereits im ersten Teilversuch beschrieben, könnten durch den nicht ganz dichten Windkanal verfälschende Turbulenzen aufgetreten sein.
- Die Skala zum Verstellen des Anstellwinkels um jeweils  $2^\circ$  ist äußerst fein, sodass das Anpassen von Hand zu signifikanten Fehlern geführt haben kann, da bereits ein Blickwinkelwechsel die Skala anders erscheinen lässt.
- Beim Ablesen der Auftriebs- und Widerstandskraft ergeben sich je nach Blickwinkel ebenfalls Messungenauigkeiten.
- Bei der Berechnung der Fläche des Tragflügels wird dessen Wölbung durch das bloße Messen der Länge und Breite vernachlässigt was wiederum zu Berechnungsfehlern führt.

## Bestimmung der Widerstandsbeiwerte $c_W$ für verschiedene Körper

Die Messungen für alle Probekörper wurde bei derselben Windgeschwindigkeit  $v$  für  $p = 35 \text{ Pa}$  mit  $\Delta p = 2,5 \text{ Pa}$  und Umgebungsdruck  $\rho = 1,205 \text{ Pa}$  durchgeführt, wodurch sich eine Strömungsgeschwindigkeit von

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \pm \left( \sqrt{\frac{1}{2\rho p}} \cdot \Delta p \right) = (7,6218 \pm 0,2722) \text{ m s}^{-1}$$

ergibt.

Anstatt der im obigen Versuch verwendeten Tragfläche  $S$  wird die angeströmte Fläche  $A$  der rotationssymmetrischen Probekörper mit der Formel

$$A = \pi r^2 \pm (2\pi r \cdot \Delta r).$$

beziehungsweise für das Spielzeugauto mit der Formel

$$A = l \cdot b \pm (2l \cdot \Delta b + 2b \cdot \Delta l)$$

mit den Fehlergrößen  $\Delta l = \Delta b = 0,0020 \text{ m}$  berechnet.

Der Widerstandsbeiwert  $c_W$  für alle rotationssymmetrischen Probekörper wird ähnlich zum Tragflügel mit einem Fehlerwert für  $\Delta F_W = 0,005 \text{ N}$  folgendermaßen berechnet:

$$c_W = \frac{2 \cdot F_W}{\rho v^2 A} \pm \left( \frac{2}{\rho v^2 A} \Delta F_W + \frac{4F_W}{\rho v^3 A} \Delta v + \frac{2F_W}{\rho v^2 r^2} \Delta r \right).$$

Eine gleichermaßen ähnliche Formel wird für das Spielzeugauto verwendet:

$$c_W = \frac{2 \cdot F_W}{\rho v^2 A} \pm \left( \frac{2}{\rho v^2 A} \Delta F_W + \frac{4F_W}{\rho v^3 A} \Delta v + \frac{2F_W}{\rho v^2 b l^2} \Delta l + \frac{2F_W}{\rho v^2 b^2 l} \Delta b \right).$$

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 2.3 aufgetragen. Kleinteilige Berechnungen und alle Werte sind wiederrum im Anhang 3 bei Tabelle 3.3 zu finden.

Körper	$d$ in cm	$r$ in cm	$A$ in $\text{m}^2$	$F_W$ in N	$c_W$	$c_{W,\text{Literatur}}$
Kugel	0,050	0,025	$0,0020 \pm 0,0004$	0,065	$0,9458 \pm 0,1477$	0,4
Halbkugelschale	0,055	0,028	$0,0024 \pm 0,0004$	0,260	$3,1267 \pm 0,3080$	1,4
Tropfen dünn vorne	0,045	0,023	$0,0016 \pm 0,0004$	0,070	$1,2575 \pm 0,1895$	-
Tropfen dick vorne	0,045	0,023	$0,0016 \pm 0,0004$	0,050	$0,8982 \pm 0,1610$	0,06
Scheibe klein	0,040	0,020	$0,0013 \pm 0,0003$	0,090	$2,0463 \pm 0,2759$	-
Scheibe mittel	0,055	0,028	$0,0024 \pm 0,0004$	0,180	$2,1647 \pm 0,2317$	1,2
Scheibe groß	0,080	0,040	$0,0050 \pm 0,0006$	0,525	$2,9842 \pm 0,2650$	-
Körper	$l$ in cm	$b$ in cm	$A$ in $\text{m}^2$	$F_W$ in N	$c_W$	$c_{W,\text{Literatur}}$
Halterung und Auto				0,060		
Halterung Auto				0,010		
Auto	0,035	0,030	$0,0011 \pm 0,0003$	0,050	$1,3605 \pm 0,4017$	-

**Tabelle 2.3:** Messergebnisse unterschiedlicher Körper im Windkanal.

Im handschriftlichen Messprotokoll wurde bei der Notation der Widerstandskraft  $F_W$  bei der kleinen Scheibe ein Fehler gemacht: Die Widerstandskraft  $F_W$  der kleinen Scheibe sollte 0,090 N, wie in Tabelle 2.3 angepasst, lauten und nicht 0,900 N, wie im Protokoll festgehalten. Dieser Wert ist unsinnig, weil so die Widerstandskraft der kleinen Scheibe deutlich größer wäre, als die der mittleren und großen Scheibe. Deswegen wurde dieser Wert in der Auswertung rückwirkend angepasst.

Die Literaturwerte wurden aus dem Buch Experimentalphysik I (Demtröder o. D., S. 233) entnommen. Beim Vergleich der berechneten Widerstandsbeiwerte  $c_W$  mit den Literaturwerten fällt auf, dass diese weit von den Vergleichswerten entfernt sind. Erwartbar wäre gewesen, dass der  $c_W$ -Wert bei allen Formen mit gleicher angeströmter Fläche  $A$  gleich ausfällt. Dies ist jedoch, wie an den Literaturwerten zu sehen, nicht der Fall.

Mögliche Fehlerquellen hierfür könnten sein:

- Der benutzte Windkanal ist sehr klein und weist weiterhin den Mangel auf, dass der Kanal durch die Einführungsöffnung für die Probekörper nicht ganz dicht ist.
- Die gemessenen Werte für die zu untersuchenden Körper sind sehr klein, was bei der Auswertung durch Rundungsfehler wiederrum zu weiteren Ungenauigkeiten führt.
- Ebenso könnte es möglich sein, dass es zu einer Verfälschung durch Reibungen am Objekt oder der Windkanalwand kommt, indem dadurch Wirbel und Turbulenzen im Kanal entstehen.

Der Widerstandsbeiwert  $c_W$  ist von der Gestalt und Oberflächenrauigkeit des Körpers, dem Turbulenzgrad und der Reynoldszahl abhängig (Meschede o.D., S. 126). Die Reynoldszahl beispielsweise muss für jedes Strömungsproblem erneut experimentell bestimmt werden (Tipler und Mosca o.D., S. 367). Eventuell waren die Probekörper in der Literatur (Demtröder o.D., S. 233) anders beschaffen oder auch abweichend geformt als die im Versuch verwendeten. Zudem war beispielsweise in der Literaturquelle auch kein Durchmesser für die untersuchte Scheibe angegeben.

## Überprüfung der quadratischen Abhängigkeit des Luftwiderstandes $F_W$

Mithilfe der genaueren Untersuchung der Halbkugelschale im Windkanal soll nun zuletzt noch die quadratische Abhängigkeit des Luftwiderstandes  $F_W$  überprüft werden. Hierfür wurde die Widerstandskraft  $F_W$  der Halbkugelschale mit  $A = 0,0024 \text{ m}^2$  für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten  $v$  gemessen und der Widerstandsbeiwert  $c_W$  analog zu den oberen Auswertungen in Abhängigkeit der variierenden Geschwindigkeiten berechnet. Die Ergebnisse hierfür sind in Tabelle 3.4 zu finden. Alle Berechnungen sind zudem im Anhang 3 bei Tabelle 3.4 zu finden.

Messung $i$	$v$ in $\text{m s}^{-1}$	$F_W$ in N	$c_W$	$\ln(v)$	$\ln(F_W)$
1	7,3	0,250	3,2716	1,9879	-1,3863
2	6,7	0,200	3,1070	1,9021	-1,6094
3	6,1	0,230	4,3106	1,8083	-1,4697
4	5,0	0,160	4,4632	1,6094	-1,8326
5	4,8	0,140	4,2375	1,5686	-1,9661
6	2,8	0,075	6,6713	1,0296	-2,5903
7	1,5	0,055	17,0469	0,4055	-2,9004

Tabelle 2.4: Messergebnisse Halbkugelschale im Windkanal.

Um die Widerstandskraft  $F_W$  in einem Diagramm gegen die Geschwindigkeit  $v$  auftragen zu können, wird zunächst der Ausdruck

$$F_W = c_W \frac{1}{2} \rho A v^N \Rightarrow \ln(F_W) = \underbrace{\ln\left(c_W \cdot \frac{1}{2} \rho\right)}_{\text{const}} + \overset{\text{Steigung}}{\widehat{N}} \cdot \ln(v)$$

logarithmiert.

Die quadratische Abhängigkeit des Luftwiderstandes von der Strömungsgeschwindigkeit lässt sich in Abbildung 2.6 analysieren.

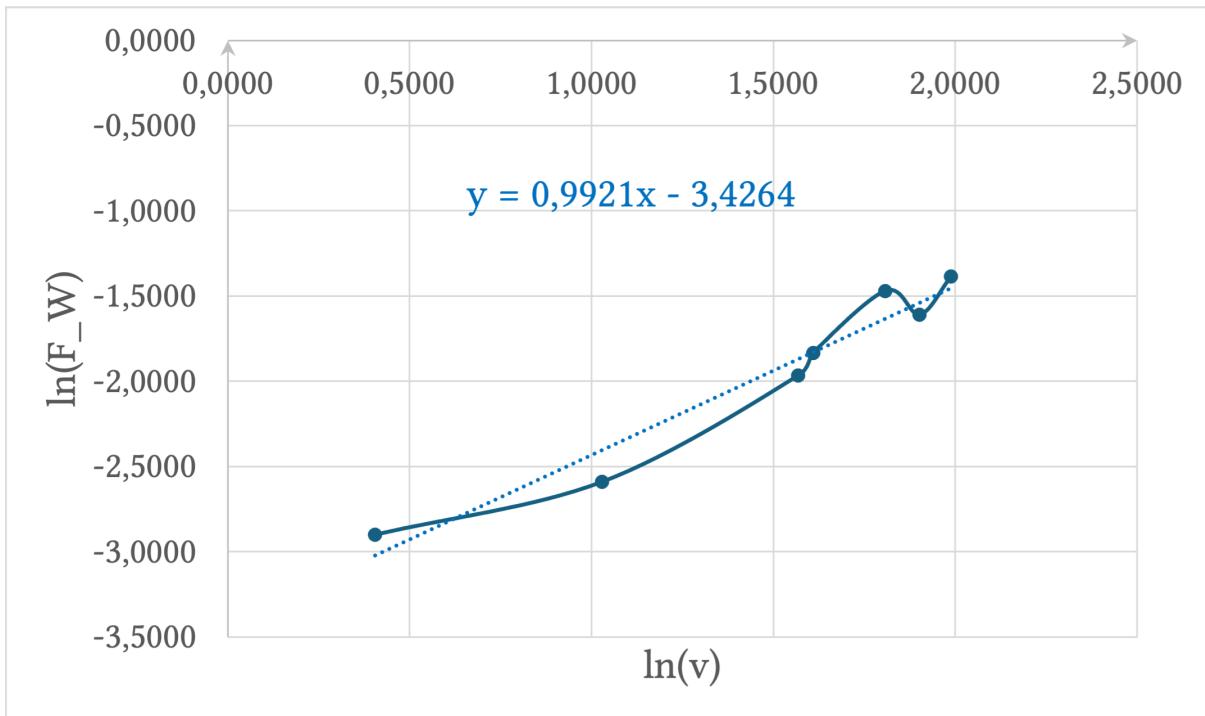


Abb. 2.6: Logarithmische Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit gegen die Widerstandskraft.

Der Parameter  $N$  gibt die Steigung der Geraden mit  $y = 0,9921x$  an. Dieser Wert liegt nun deutlich näher am Literaturwert  $c_W = 1,4$  als bei der zuvorigen Untersuchung (Demtröder o. D., S. 233). Dies liegt vermutlich daran, dass mehrere Messungen durchgeführt wurden.



# Literatur

- Demtröder, Wolfgang (o. D.). *Experimentalphysik* 1. 8. Aufl. Kaiserslautern: Springer Spektrum.  
Meschede, Dieter (o. D.). *Gerthsen Physik*. 24. Aufl. Heidelberg: Springer.  
o.V. (WiSe 2024). *Versuchsanleitung - M7 Windkanal*.  
Tipler, Paul und Gene Mosca (o. D.). *Tipler Physik*. 9. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.



### 3 Anhang

#### Messergebnisse Windkanal mit Bernoulli-Rampe

$A$ in $\text{m}^2$	$p$ in Pa	$v_{\text{gem}}$ in $\text{m s}^{-1}$	$v_{\text{ber}}$ in $\text{m s}^{-1}$	$\Delta v$ in $\text{m s}^{-1}$	$A \cdot v$ in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	$\Delta(A \cdot v)$ in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
0,0150	60	10,0	9,9792	0,2079	0,1497	0,0031
0,0160	56	9,6	9,6409	0,2152	0,1543	0,0035
0,0170	51	9,1	9,2004	0,2255	0,1564	0,0038
0,0180	46	8,8	8,7378	0,2374	0,1573	0,0043
0,0190	41	8,1	8,2492	0,2515	0,1567	0,0048
0,0200	37	7,8	7,8365	0,2647	0,1567	0,0053

Tabelle 3.1: Messergebnisse Windkanal mit Bernoulli-Rampe und Prandl-Rohr.

Bernoulli-Rampe  $x = 4 \text{ cm} \hat{=} 0,001 \text{ m}^2$  Änderung der durchströmten Fläche mit  $\Delta x = 15 \text{ cm}$   
 $\Rightarrow \Delta A = 0,001 \text{ m}^2 \cdot 0,0015 \text{ m}^2 = 0,0000015 \text{ m}^2$

$$\Delta p = 2,5 \text{ Pa}$$

$$T_0 = 273,15 \text{ K} \hat{=} 0^\circ\text{C}$$

$$\rho_0 = 1,2928 \text{ Pa} \text{ Dichte von Luft}$$

$$T = 293,15 \text{ K} \hat{=} 20^\circ\text{C} \text{ Raumtemperatur}$$

$$\rho_{\text{Luft}} = \rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T} = 1,2928 \text{ Pa} \cdot \frac{273,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}} = 1,205 \text{ Pa} \quad \text{Umgebungsdruck}$$

Die Windgeschwindigkeit wird mit der Formel

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}}$$

berechnet.

Exemplarisch für  $p = 60 \text{ Pa}$  :

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 60 \text{ Pa}}{1,205 \text{ Pa}}} = 9,9792 \text{ m s}^{-1}$$

Dasselbe Vorgehen wird analog für alle weiteren Staudrücke durchgeführt.

Der Messfehler  $\Delta v$  für die Windgeschwindigkeit wird folgendermaßen gebildet:

$$\Delta v = \left| \frac{dp}{dv} \right| \Delta p = \sqrt{\frac{1}{2\rho p}} \cdot \Delta p.$$

Erneut exemplarisch für  $p = 60 \text{ Pa}$  :

$$\Delta v = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 1,205 \text{ Pa} \cdot 60 \text{ Pa}}} \cdot 2,5 \text{ Pa} = 0,2079 \text{ m s}^{-1}$$

Der Volumenstrom  $Q$  ergibt sich folgendermaßen:

$$Q = A \cdot v \pm (v \cdot \Delta A + A \cdot \Delta v)$$

Exemplarisch für  $p = 60 \text{ Pa}$  :

$$\begin{aligned} Q &= A \cdot v \pm (v \cdot \Delta A + A \cdot \Delta v) \\ &= 0,0150 \text{ m}^2 \cdot 9,9792 \text{ m s}^{-1} \pm (9,9792 \text{ m s}^{-1} \cdot 0,0031 \text{ m}^2 + 0,0150 \text{ m}^2 \cdot 0,2079 \text{ m s}^{-1}) \\ &= (0,1497 \pm 0,0031) \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}. \end{aligned}$$

Alle hiermit berechneten Werte sind in Tabelle 3.1 zu finden.

## Messergebnisse der Tragfläche im Windkanal

$\varphi$	$F_A$ in N	$F_W$ in N	$c_A$	$c_W$	$\Delta c_A$	$\Delta c_W$
-8	-0,85	0,180	-1,7369	0,3678	-0,1442	0,0840
-6	-0,65	0,090	-1,3282	0,1839	-0,0622	0,0471
-4	-0,30	0,075	-0,6130	0,1533	-0,0813	0,0410
-2	-0,17	0,060	-0,3474	0,1226	0,1346	0,0348
0	0,35	0,075	0,7152	0,1533	0,3479	0,0410
2	0,51	0,090	1,0421	0,1839	0,4135	0,0471
4	0,80	0,090	1,6347	0,1839	0,5324	0,0471
6	1,15	0,180	2,3499	0,3678	0,6750	0,0840
8	1,25	0,230	2,5543	0,4700	0,7170	0,1045
10	1,45	0,270	2,9630	0,5517	0,7990	0,1209
12	1,75	0,420	3,5760	0,8582	0,9220	0,1825
14	2,00	0,570	4,0868	1,1648	1,0245	0,2440

Tabelle 3.2: Messergebnisse der Tragfläche im Windkanal.

Berechne zunächst die Windgeschwindigkeit  $v$  für  $p = 15 \text{ Pa}$  mit  $\Delta p = 2,5 \text{ Pa}$  und Umgebungsdruck  $\rho = 1,205 \text{ Pa}$  :

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \pm \left( \sqrt{\frac{1}{2\rho p}} \cdot \Delta p \right) = (4,99 \pm 0,42) \text{ m s}^{-1}$$

Die Flügelfläche des im Versuch benutzten Tragflügels ergibt sich durch

$$S = l \cdot b = 0,225 \text{ m}^2 \cdot 0,145 \text{ m}^2 = 0,032625 \text{ m}^2$$

Der Widerstandsbeiwert  $c_W$  wird folgendermaßen ermittelt:

$$c_W = \frac{2 \cdot F_W}{\rho v^2 S} \pm \left( \frac{2}{\rho v^2 S} \Delta F_W + \frac{4F_W}{\rho v^3 S} \Delta v + \frac{2F_W}{\rho v^2 b l^2} \Delta l + \frac{2F_W}{\rho v^2 b^2 l} \Delta b \right),$$

wobei sich der Messfehler über die Formel

$$\Delta c_W = \left| \frac{\partial c_W}{\partial F_W} \right| \Delta F_W + \left| \frac{\partial c_W}{\partial v} \right| \Delta v + \left| \frac{\partial c_W}{\partial l} \right| \Delta l + \left| \frac{\partial c_W}{\partial b} \right| \Delta b$$

berechnen lässt.

Gleichermaßen wird der Auftriebskraftbeiwert  $c_A$  berechnet:

$$c_A = \frac{2 \cdot F_A}{\rho v^2 S} \pm \left( \frac{2}{\rho v^2 S} \Delta F_A + \frac{4F_A}{\rho v^3 S} \Delta v + \frac{2F_A}{\rho v^2 b l^2} \Delta l + \frac{2F_A}{\rho v^2 b^2 l} \Delta b \right),$$

mit dem Messfehler

$$\Delta c_A = \left| \frac{\partial c_A}{\partial F_A} \right| \Delta F_A + \left| \frac{\partial c_A}{\partial v} \right| \Delta v + \left| \frac{\partial c_A}{\partial l} \right| \Delta l + \left| \frac{\partial c_A}{\partial b} \right| \Delta b.$$

Exemplarisch für die Messwerte des Anstellwinkels -8°:

$$\begin{aligned} c_W &= \frac{2 \cdot 0,180 \text{ N}}{1,205 \text{ Pa} \cdot (4,99 \text{ m s}^{-1})^2 \cdot 0,0327 \text{ m}^2} \\ &\pm \left( \frac{2}{1,205 \text{ Pa} \cdot (4,99 \text{ m s}^{-1})^2 \cdot 0,0327 \text{ m}^2} \cdot 0,005 \text{ N} \right. \\ &+ \frac{4 \cdot 0,180 \text{ N}}{4,99 \text{ m s}^{-1})^3 \cdot 0,0327 \text{ m}^2} \cdot 0,42 \text{ m s}^{-1} \\ &+ \frac{2 \cdot 0,180 \text{ N}}{1,205 \text{ Pa} \cdot (4,99 \text{ m s}^{-1})^2 \cdot 0,225 \text{ m} \cdot (0,145 \text{ m})^2} \cdot 0,003 \text{ m} \\ &\left. + \frac{2 \cdot 0,180 \text{ N}}{1,205 \text{ Pa} \cdot (4,99 \text{ m s}^{-1})^2 \cdot (0,225 \text{ m})^2 \cdot 0,145 \text{ m}} \cdot 0,003 \text{ m} \right) \\ &= (0,3678 \pm 0,0849), \end{aligned}$$

wobei folgende Fehlerwerte angenommen wurden:

$$\Delta F_A = 0,100 \text{ N},$$

$$\Delta F_W = 0,005 \text{ N},$$

$$\Delta l = \Delta b = 0,003 \text{ m}$$

Ebenfalls wird so für  $c_A$  verfahren:

$$\begin{aligned} c_A &= \frac{2 \cdot (-0,85 \text{ N})}{1,205 \text{ Pa} \cdot (4,99 \text{ m s}^{-1})^2 \cdot 0,0327 \text{ m}^2} \\ &\pm \left( \frac{2}{1,205 \text{ Pa} \cdot (4,99 \text{ m s}^{-1})^2 \cdot 0,0327 \text{ m}^2} \cdot 0,005 \text{ N} \right. \\ &+ \frac{4 \cdot (-0,85 \text{ N})}{4,99 \text{ m s}^{-1})^3 \cdot 0,0327 \text{ m}^2} \cdot 0,42 \text{ m s}^{-1} \\ &+ \frac{2 \cdot (-0,85 \text{ N})}{1,205 \text{ Pa} \cdot (4,99 \text{ m s}^{-1})^2 \cdot 0,225 \text{ m} \cdot (0,145 \text{ m})^2} \cdot 0,003 \text{ m} \\ &\left. + \frac{2 \cdot (-0,85 \text{ N})}{1,205 \text{ Pa} \cdot (4,99 \text{ m s}^{-1})^2 \cdot (0,225 \text{ m})^2 \cdot 0,145 \text{ m}} \cdot 0,003 \text{ m} \right) \\ &= (-1,7369 \mp 0,1442), \end{aligned}$$

Alle anderen Werte in Tabelle 3.2 werden analog berechnet.

Anhand Abbildung 2.5 lässt sich der ideale Anstellwinkel bei  $4^\circ$  mit Werten für  $c_A = 1,6347$  und  $c_W = 0,1839$  ablesen. Daraus lässt sich die Gleitzahl

$$\varepsilon = \frac{c_W}{c_A} = \frac{F_W}{F_A} = \frac{0,1839}{1,6347} = 0,1125$$

ermitteln.

## Messergebnisse unterschiedlicher Körper im Windkanal

Körper	$d$ in cm	$r$ in cm	$A$ in $\text{m}^2$	$\Delta A$ in $\text{m}^2$	$F_W$ in N	$c_W$	$\Delta c_W$	$c_{W,\text{Literatur}}$
Kugel	0,050	0,025	0,0020	0,0004	0,065	0,9458	0,1477	0,4
Halbkugelschale	0,055	0,028	0,0024	0,0004	0,260	3,1267	0,3080	1,4
Tropfen dünn vorne	0,045	0,023	0,0016	0,0004	0,070	1,2575	0,1895	-
Tropfen dick vorne	0,045	0,023	0,0016	0,0004	0,050	0,8982	0,1610	0,06
Scheibe klein	0,040	0,020	0,0013	0,0003	0,090	2,0463	0,2759	-
Scheibe mittel	0,055	0,028	0,0024	0,0004	0,180	2,1647	0,2317	1,2
Scheibe groß	0,080	0,040	0,0050	0,0006	0,525	2,9842	0,2650	-
Körper	$l$ in cm	$b$ in cm	$A$ in $\text{m}^2$	$\Delta A$ in $\text{m}^2$	$F_W$ in N	$c_W$	$\Delta c_W$	$c_{W,\text{Literatur}}$
Halterung und Auto					0,060			
Halterung Auto					0,010			
Auto	0,035	0,030	0,0011	0,0003	0,050	1,3605	0,4017	-

Tabelle 3.3: Messergebnisse unterschiedlicher Körper im Windkanal.

Ermittle die für alle Probekörper eingestellte Windgeschwindigkeit  $v$  für  $p = 35 \text{ Pa}$  mit  $\Delta p = 2,5 \text{ Pa}$  und Umgebungsdruck  $\rho = 1,205 \text{ Pa}$  :

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \pm \left( \sqrt{\frac{1}{2\rho p}} \cdot \Delta p \right) = (7,6218 \pm 0,2722) \text{ m s}^{-1}$$

Die angeströmten Flächen  $A$  für die Probefiguren, bei welchen der Durchmesser (Radius  $r = \frac{d}{2}$ ) gemessen wurde, berechnet sich wie folgt:

$$A = \pi r^2 \pm (2\pi r \cdot \Delta r).$$

Folgende Fehlergrößen werden bei allen Berechnungen in Tabelle 3.3 verwendet:

$$\Delta d = 0,0050 \text{ m} \Rightarrow \Delta r = 0,0025 \text{ m}, \quad \Delta l = \Delta b = 0,0020 \text{ m}, \quad \Delta F_W = 0,005 \text{ N}$$

Exemplarisch für die Kugel:

$$A = \pi \cdot (0,025 \text{ m})^2 \pm (2\pi \cdot 0,025 \text{ m} \cdot 0,0025 \text{ m}) = (0,0020 \pm 0,0004) \text{ m}^2.$$

Die Flächen aller weiterer Körper (ausgenommen das Auto) in Tabelle 3.3 werden analog ermittelt.

Der Widerstandsbeiwert  $c_W$  für alle rotationssymmetrischen Probekörper wird mit folgender Formel berechnet:

$$c_W = \frac{2 \cdot F_W}{\rho v^2 A} \pm \left( \frac{2}{\rho v^2 A} \Delta F_W + \frac{4F_W}{\rho v^3 A} \Delta v + \frac{2F_W}{\rho v^2 r^2} \Delta r \right).$$

Die angeströmte Fläche  $A$  für das Auto berechnet sich über:

$$\begin{aligned} A &= l \cdot b \pm (2l \cdot \Delta b + 2b \cdot \Delta l) \\ &= 0,035 \text{ m} \cdot 0,030 \text{ m} \pm (2 \cdot 0,035 \text{ m} \cdot 0,0020 \text{ m} + 2 \cdot 0,030 \text{ m} \cdot 0,0020 \text{ m}) \\ &= (0,0011 \pm 0,0003) \text{ m}^2. \end{aligned}$$

Für das Auto wurde zuerst der Staudruck der Halterung ohne Auto gemessen welcher danach vom Messwert des Staudrucks der Halterung mit Auto abgezogen wird.

Der Widerstandsbeiwert  $c_W$  für das Auto wird ähnlich wie oben ermittelt:

$$c_W = \frac{2 \cdot F_W}{\rho v^2 A} \pm \left( \frac{2}{\rho v^2 A} \Delta F_W + \frac{4F_W}{\rho v^3 A} \Delta v + \frac{2F_W}{\rho v^2 b l^2} \Delta l + \frac{2F_W}{\rho v^2 b^2 l} \Delta b \right).$$

## Messergebnisse Halbkugelschale im Windkanal

Messung $i$	$v$ in $\text{m s}^{-1}$	$F_W$ in N	$c_W$	$\ln(v)$	$\ln(F_W)$
1	7,3	0,250	3,2716	1,9879	-1,3863
2	6,7	0,200	3,1070	1,9021	-1,6094
3	6,1	0,230	4,3106	1,8083	-1,4697
4	5,0	0,160	4,4632	1,6094	-1,8326
5	4,8	0,140	4,2375	1,5686	-1,9661
6	2,8	0,075	6,6713	1,0296	-2,5903
7	1,5	0,055	17,0469	0,4055	-2,9004

**Tabelle 3.4:** Messergebnisse Halbkugelschale im Windkanal.

$$A_{\text{Halbkugelschale}} = 0,0024 \text{ m}^2$$

Der Widerstandsbeiwert  $c_W$  für die Halbkugelschale wird nun für die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten nochmals mit der Formel

$$c_W = \frac{2 \cdot F_W}{\rho v^2 A} \pm \left( \frac{2}{\rho v^2 A} \Delta F_W + \frac{4F_W}{\rho v^3 A} \Delta v + \frac{2F_W}{\rho v^2 r^2} \Delta r \right)$$

berechnet.

Logarithmiere den Ausdruck

$$F_W = c_W \frac{1}{2} \rho A v^N \Rightarrow \ln(F_W) = \ln \left( \overbrace{c_W \cdot \frac{1}{2} \rho}^{\text{const}} \right) + \underbrace{\frac{\text{Steigung}}{N}}_{\tilde{N}} \cdot \ln(v),$$

um die quadratische Abhängigkeit des Luftwiderstandes von der Strömungsgeschwindigkeit zu zeigen.

## Versuch 1

Gruppe A06

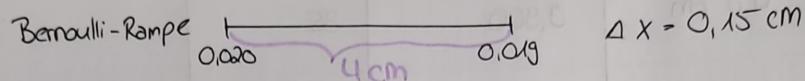
29.11.24

Staudruck mit Prandl-Rohr messen

Raumtemperatur  $t = 20-21^\circ\text{C}$

$$\Delta A = 0,0003 \text{ m}^2 \quad \Delta p = 25 \quad \Delta v = 2,0$$

Position	$A$ in $\text{m}^2$	Staudruck in Pa	$v$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
1	0,015	60	10,0
2	0,016	56	9,6
3	0,017	51	9,1
4	0,018	46	8,8
5	0,019	41	8,1
6	0,020	37	7,8



## Versuch 2

Tragflügel

Winkel $\gamma$	$F_A$ Auftrieb in N	$F_w$ Widerstand in N
-8°	-0,85	0,180
-6°	-0,65	0,090
-4°	-0,30	0,075
-2°	-0,17	0,060
0°	0,35	0,075
2°	0,51	0,090
4°	0,80	0,090
6°	1,15	0,180
8°	1,25	0,230
10°	1,45	0,270
12°	1,75	0,420
14°	2,00	0,570

$$\Delta \gamma = \pm 1^\circ \rightarrow \text{Blickwinkel}$$

$$\Delta F_A = 0,1 \rightarrow \text{Blickwinkel}$$

$$\Delta F_w = 0,005$$

$p = 15 \text{ Pa} \rightarrow$  gemessen mit  
Prandl-Rohr

Fläche Tragflügel:

$$l = 22,5 \pm 0,3 \text{ cm}$$

$$b = 14,5 \pm 0,3 \text{ cm}$$

Körper	Durchmesser d	Widerstand $F_w$	Druck p	Fläche A gesucht
Kugel	5,0 cm	0,065	35	
Hohle Halbkugel	5,5 cm	0,260	35	
Kegel dünn vorne	4,5 cm	0,070	35	
Kegel dick vorne	4,5 cm	0,050	35	
Scheibe klein	4,0 cm	0,900	35	
Scheibe mittel	5,5 cm	0,180	35	
Scheibe groß	8,0 cm	0,525	35	

## Versuch 3

Gruppe AC6

29.11.24

Auto

$$l = 3,5 \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$b = 3,3 \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$F_w, \text{ ohne} = 0,01$$

↳ nur Plattform

$$F_w, \text{ mit} = 0,06$$

$$p = 35$$

$$\Delta d = 0,5 \text{ cm}$$

$$\Delta F_w = 0,005 \text{ N}$$

$$\Delta p = 2,5$$

Messfehler: Körper teils. leicht schräg → Stirnfläche nicht exakt gerade im Wind

→ Abwarten bis Windkanal angefahren ist, teils. nach kurzer Wartezeit doch noch etwas mehr Ausschlag

## Halbkugelschale

Messung i	v in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$F_w$ in N
1	7,3	0,250
2	6,1	0,230
3	4,8	0,140
4	2,8	0,075
5	1,5	0,055
6	6,7	0,200
7	5,0	0,160

## Versuch 4

Messfehler bei v: Wassersäule nicht „gerade“ sondern ==

Köbler