

Untersuchung von Strömungseigenschaften

Ziele

- Messungen mit dem Prandtl'schen Staurohr
- Überprüfung der Bernoullischen Gleichung
- Überprüfung der Kontinuitätsgleichung
- Widerstands- und Auftriebsmessungen

1 Grundlagen

1.1 Vorbemerkung

In der Strömungslehre können als Medium sowohl Gase (in diesem Versuch wird ausschließlich Luft verwendet) als auch Flüssigkeiten mit den gleichen Gesetzen beschrieben werden. Die Kompressibilität des Gases kann nämlich für Strömungsgeschwindigkeiten, die wesentlich kleiner als die Schallgeschwindigkeit sind, getrost vernachlässigt werden. Das Gebiet der Strömungslehre wird häufig auch als „Hydromechanik“ bezeichnet. Dies ist allerdings irreführend, da die Vorsilbe „Hydro“ eigentlich Wasser beschreibt und damit eine Flüssigkeit gemeint ist.

Die Strömungslehre stellt eines der komplizierteren Kapitel der Physik dar und wird in manchen Büchern nur am Rande in fast rein qualitativer Weise behandelt. So etwa in den ansonsten recht erbaulich zu lesenden amerikanischen Werken **Giancoli** oder **Halliday/Resnick**. In den klassischen deutschen Werken **Gerthsen** und **Bergmann-Schaefer** (Band 1) erscheint die Darstellung zwar quantitativer, jedoch, je nach Ausgabe, gelinde gesagt ein wenig verworren – ein schwieriges Kapitel eben, das der*die Anfänger*in sich nur zu gerne für die späteren theoretischen Kurse aufspart.

Einige Grundzüge sollten jedoch nicht aufgespart werden, da man sie auch experimentell gut behandeln kann, wie zum Beispiel in dem vorliegenden Versuch.

1.2 Kontinuitätsgleichung

Strömt Luft in einem Rohr¹, das nacheinander zwei verschiedene Querschnitte A_1 und A_2

¹ Das Rohr kann auch nur eine gedachte räumliche Begrenzung sein, die dann „Stromröhre“ genannt wird.

aufweist, so gilt für die Geschwindigkeiten $u_{1,2}$ in den betreffenden Bereichen die bekannte Kontinuitätsgleichung

$$A_1 u_1 = A_2 u_2 . \quad (1)$$

Multipliziert man Gleichung (1) mit einer Zeitspanne dt , so stellen beide Seiten nichts anderes als das Luftvolumen dar, das während dt durch die beiden Querschnitte fließt. Die Gleichung steht also für die Kontinuität des Luftstromes, was in dt durch A_1 geht muss auch durch A_2 , die Stoffmenge bleibt erhalten. In der Elektrizitätslehre (Ladungserhaltung) und in vielen anderen Bereichen erscheinen äquivalente Gleichungen.

1.3 Volumenelemente, Stromlinien, Bahnlinien, stationäre Strömung

Eine Strömung wird beschrieben, indem man das strömende Medium in Volumenelemente (VE) zerlegt und deren Geschwindigkeiten \vec{u}_i ermittelt. Die Gesamtheit der Geschwindigkeiten stellt also ein Vektorfeld dar, das auch durch „Stromlinien“ beschrieben werden kann (gleiches Prinzip wie bei elektrischem Feld, Gravitationsfeld, etc.). Wenn sich \vec{u} an allen Orten nicht zeitlich ändert, heißt die Strömung stationär. Bei einer stationären Strömung bewegen sich die VE entlang der Stromlinien, d. h. Bahn- und Stromlinien sind identisch. Alles folgende beschränkt sich auf diesen Fall.

1.4 Ideale Strömung und die Bernoulli-Gleichung

Vernachlässigt man die innere Reibung oder Viskosität der Luft, so gelten zwei Besonderheiten. Erstens behalten die Luft-VE auf ihren Flugbahnen ihre Energie und zweitens sind diese Flugbahnen „glatt“, d. h. es entstehen keine Wirbel. Einen Wirbel kann man exakt nur mit einem Linienintegral, der Zirkulation, definieren. Es soll hier die Annahme gelten, dass ein Wirbel dann vorliegt, wenn der Bewegung der VE eine Kreisbewegung überlagert ist.

Dem ersten Punkt (konstante Energie) trägt die Bernoulli-Gleichung Rechnung. Unter Vernachlässigung eines hier irrelevanten Schwereterms (siehe Lehrbuch) lautet sie:

$$\begin{array}{ccccc}
 p & + & \frac{1}{2} \rho v^2 & = & p_0 & (2) \\
 \text{statischer Druck} & & \text{Dynamischer Druck} & & \text{Gesamtdruck} & \\
 & & \text{oder Staudruck} & & &
 \end{array}$$

Es sei nochmals betont, dass man zur Herleitung von Gleichung (2) nur den Energiesatz (ohne Reibungsarbeit) zu verwenden braucht.

Gleichung (2) besagt auch, dass man in der Strömung verschiedene Drücke unterscheiden muss. Bei einem freien Luftstrom, der z. B. durch ein Gebläse erzeugt wird, ist mit p_0 der äußere Luftdruck

im Gebiet ohne Strömung zu identifizieren. Wo größere Geschwindigkeiten zu beobachten sind, herrscht ein geringerer statischer Druck. Diese Faustregel ist von großer Bedeutung, wenn man die Druckkräfte auf umströmte Körper untersucht (siehe unten). Es soll nun betrachtet werden, wie man die einzelnen Drücke messen kann.

1.5 Drucksonden

Eine Sonde, wie in Abbildung (1) dargestellt, misst nur den statischen Druck, da in den Öffnungen „O“ $u = 0$ herrscht. Der wirksame Druck an der Seitenfläche des Rohres ist also niedriger als der Umgebungsdruck. Diese Tatsache wird weithin ausgenutzt, z. B. zur Erklärung des Tragflächenauftriebes (siehe unten).

Mit einer etwas modifizierten Anordnung, dem sogenannten **Prandtl'schen Staurohr**, kann der Staudruck direkt gemessen werden. Abbildung (2) zeigt den Aufbau im Schnitt. Wesentlich ist zu erkennen, dass kurz hinter der Öffnung des zentralen Rohres $u = 0$ herrschen muss und

kurz davor noch $u = v_{\text{Strömung}}$. Die seitlichen Öffnungen entsprechen denen bei der oben gezeigten Sonde.

Mithin misst das Manometer die Differenz zwischen Gesamtdruck und statischem Druck, also den Staudruck $p_{\text{St}} = 1/2 \rho v_{\text{Strömung}}^2$. Man kann damit also die Strömungsgeschwindigkeit messen, wenn man $\rho_{\text{Luft}} \approx 1,2 \text{ kg m}^{-3}$ kennt. In diesem Versuch wird statt des U-Rohrs in Abbildung (2) ein elektronisches Differenzdruckmanometer verwendet, das folglich p_{St} anzeigt.

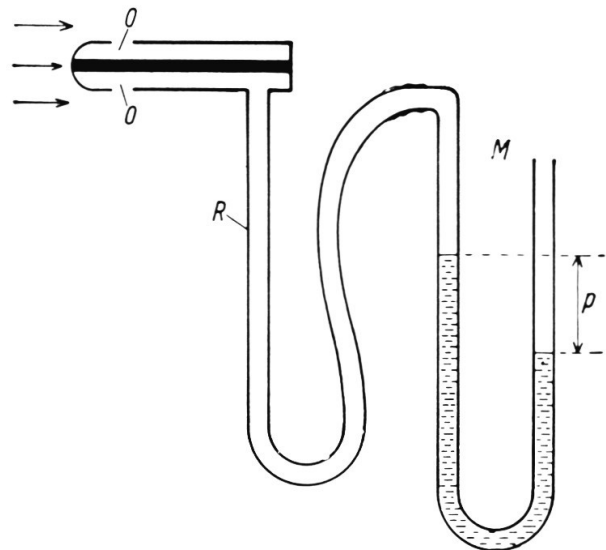


Abbildung 1: Drucksonde mit Flüssigkeitsmanometer zur Messung des statischen Druckes in der Strömung. Zu beachten ist, dass dieser niedriger als der Luftdruck im strömungsfreien Gebiet ist, wo der andere Schenkel des U-Rohres endet.

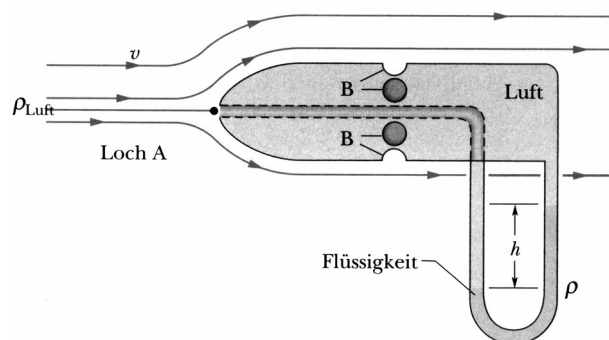


Abbildung 2: Staurohr nach Ludwig Prandtl, dem großen Physiker der Strömungslehre. Sein Buch „Führer durch die Strömungslehre“ erschien 2002 in der 11. Auflage (Herausgeber: Oertel).

1.6 Bernoulli-Rampe

Der in Abbildung (3) gezeigte Aufbau erlaubt die Staudruckmessung bei verschiedenen Querschnitten eines Windkanals. Damit kann offenbar die Kontinuitätsgleichung überprüft werden.

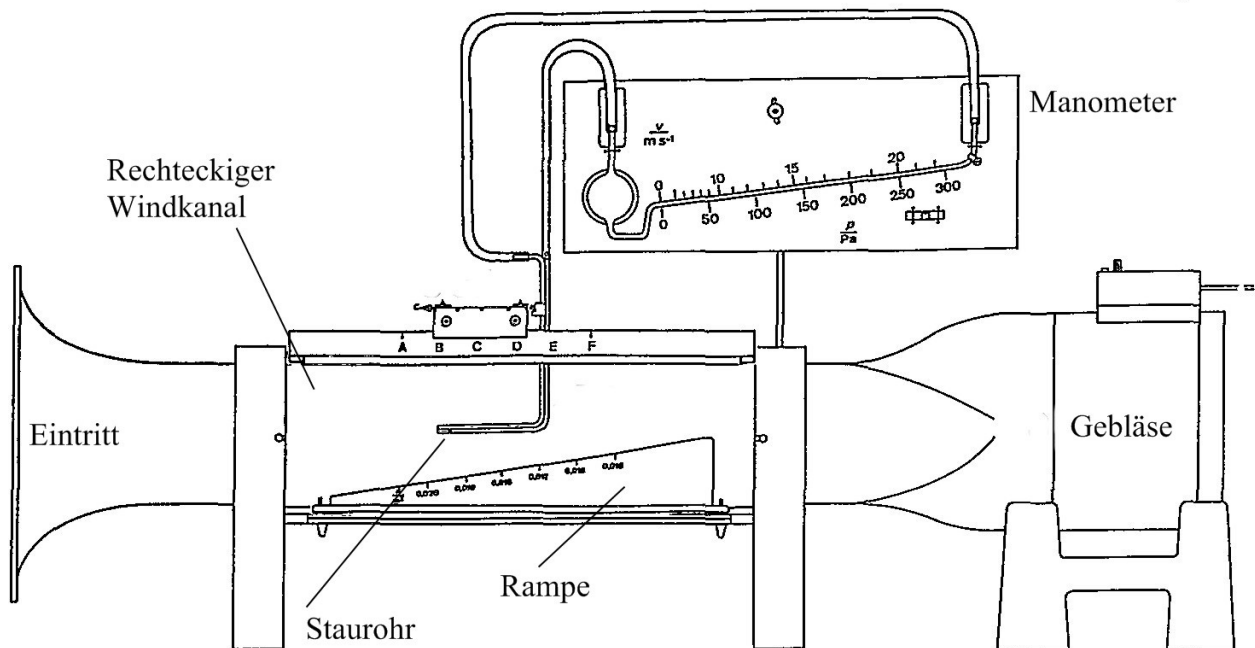


Abbildung 3: Aufbau zur Bernoulli-Rampe. Das Gebläse saugt die Luft von links nach rechts durch den Windkanal. Statt des gezeigten Flüssigkeitsmanometers wird ein Piezomanometer mit Digitalanzeige verwendet.

Der freie Querschnitt A im Windkanal ist auf der Rampe angegeben. Löst man die Kontinuitätsgleichung in der Form $Au = \text{const}$ nach u auf und setzt das Ergebnis in den Ausdruck für den

Staudruck $p_{\text{St}} = \frac{1}{2} \rho u^2$ ein, so erhält man die Beziehung

$$p_{\text{St}} = \frac{\text{const}^2}{A^2}. \quad (3)$$

Diese Beziehung soll in Aufgabe 2.2 getestet werden.

1.7 Reale Strömung und der Strömungswiderstand

Bei idealer Strömung, d. h. ohne Berücksichtigung der Viskosität η , existiert kein Strömungswiderstand. Dies und die wahren Verhältnisse schildert der **Gerthsen** in der 18. Auflage so vorzüglich, dass hier der Einfachheit halber eine Kopie der betreffenden Passagen einfügt wird.

Die Stromlinien einer idealen Flüssigkeit um eine Kugel weichen symmetrisch zur Äquatorebene aus (Abb. 3.63). An den Polen P und P' sind Staugebiete ($v = 0$), am schnellsten strömt die Flüssigkeit am Äquator. Nach der Bernoulli-Gleichung nimmt daher der statische Druck vom Pol zum Äquator hin ab und dann genau symmetrisch zum anderen Pol hin wieder zu. Diese symmetrische Druckverteilung kann keine resultierende Kraft auf die Kugel ausüben: Eine Kugel böte einer idealen (reibungsfreien) Flüssigkeit keinen Widerstand. Um sie mit konstanter Geschwindigkeit durch die ruhende Flüssigkeit zu ziehen, brauchte man keine Kraft. Ähnliches gilt für die Umströmung von Körpern anderer Form durch ideale Flüssigkeiten.

Dieser Widerspruch zur Erfahrung löst sich folgendermaßen: Im ersten Anlaufen der Strömung sieht das Stromlinienbild tatsächlich wie in Abb. 3.63 aus. Nach kurzer Zeit aber ändert die unvermeidliche Reibung in der Grenzschicht um die Kugel und beim Wiederzusammenlaufen der Flüssigkeit hinter der Kugel das Strömungsbild (**Totwasser** im Lee); es treten **Wirbel** hinter dem Hindernis auf, die Stromlinien und damit auch die statischen Drücke sind nicht mehr symmetrisch verteilt. Der Strömungswiderstand läßt sich nach **Newton** durch die kinetische Energie ausdrücken, die in die Geschwindigkeitsänderung von Flüssigkeitsteilchen investiert werden muß (Abschn. 1.5.9d). In Abb. 3.63 würde die vorn aufzuwendende Energie hinten wieder zurückerstattet werden. In Wirklichkeit, in der nichtidealen Flüssigkeit, geht sie aber in Wirbel über und kommt dem umströmten Körper nicht wieder zugute. Damit ergibt sich der bekannte Ausdruck für die Kraft, die ein Körper vom Querschnitt A erfährt, der mit der Geschwindigkeit v turbulent umströmt wird:

$$F = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2. \quad (3.54)$$

Der **Widerstandsbeiwert** c_w hängt von der Gestalt und Oberflächenrauigkeit des Körpers ab, ferner von der Reynolds-Zahl, der Mach-Zahl und dem Turbulenzgrad der Strömung.

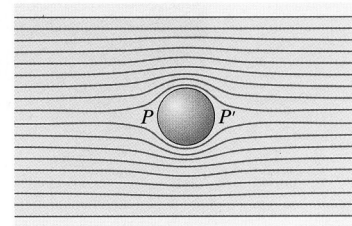


Abb. 3.63. Stromlinien in einer idealen Flüssigkeit um eine Kugel (oder einen Zylinder)

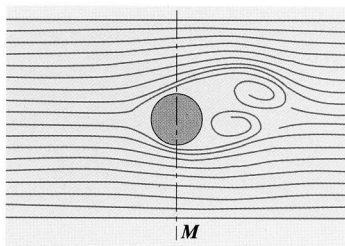


Abb. 3.64. Bildung von Wirbeln in einer realen Flüssigkeit bei der Umströmung eines Zylinders (von links nach rechts)

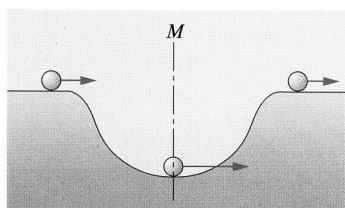


Abb. 3.65. Modellvorstellung zur Geschwindigkeitsverteilung in einer Potentialströmung um einen Zylinder

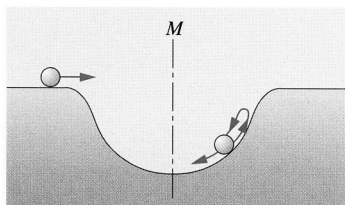


Abb. 3.66. Modellvorstellung zur Wirbelbildung infolge der Grenzschichtreibung

An der Oberfläche eines Körpers, der von einer Flüssigkeit umströmt wird, bildet sich wegen des Haftens eine **Grenzschicht** (Abschn. 3.3.3f). In ihr besteht senkrecht zur Oberfläche ein Geschwindigkeitsgefälle dv/dz , welches um so steiler ist, je dünner die Grenzschicht ist, also besonders groß in Flüssigkeiten von sehr kleiner Viskosität. In dieser Grenzschicht wirken Reibungskräfte, die wir bei der Untersuchung der Kräfte, welche in idealen Flüssigkeiten wirken, vernachlässigt haben. Sie sind aber von wesentlichem Einfluß auf die Strömungserscheinungen. Ihre Berücksichtigung bedeutet den Übergang von den idealen zu den *realen* Flüssigkeiten. Sie bedingen das Auftreten von Wirbeln bei der Umströmung von Körpern durch reale Flüssigkeiten.

Bei der idealen Potentialströmung um einen Zylinder nimmt die Geschwindigkeit bei Annäherung an die Mittellebene M (Abb. 3.64) zu. Die Flüssigkeitsteilchen werden durch das Druckgefälle beschleunigt; hinter der Mittellebene können sie aufgrund ihrer vermehrten kinetischen Energie gegen das Druckgefälle anlaufen und verlieren hier infolgedessen wieder an Geschwindigkeit, bis sie (bei fehlender Reibung) weit hinter dem Hindernis die gleiche Geschwindigkeit besitzen wie davor. Die Teilchen verhalten sich wie Kugeln, die von einer reibungsfreien, horizontalen Ebene in eine Höhlung rollen, an ihrem Boden eine höhere Geschwindigkeit haben, sie aber nach Hinaufrollen der Böschung wieder einbüßen, um auf die horizontale Ebene mit der Anfangsgeschwindigkeit auszutreten (Abb. 3.65). Ist aber Reibung zu überwinden, so muß die Kugel beim Hinaufrollen zur Umkehr kommen, wenn die Reibungsarbeit größer ist als die vor dem Hineinrollen vorhandene kinetische Energie (Abb. 3.66). Ähnlich ist es bei der strömenden realen Flüssigkeit: Die Flüssigkeitsteilchen können infolge der Grenzschichtreibung hinter der Mittellebene M zur Umkehr kommen. Dadurch wird eine Drehung eingeleitet, und es bildet sich hinter dem Zylinder ein **Wirbelpaar** mit entgegengesetztem Drehsinn (Abb. 3.64). Die an den Wirbeln vorbeiströmende Flüssigkeit nimmt abwechselnd den einen und dann den anderen dieser Wirbel mit. Nach Ablösung der Wirbel bilden sich wieder neue, die auch abgelöst werden, hinter dem Zylinder entsteht eine **Wirbelstraße**.

Die Mittellebene M ist nicht mehr Symmetrieebene; nun wird auf den Zylinder eine Kraft übertragen, die man nach *Bernoulli* berechnen kann, wenn man das Strömungsfeld kennt. Daß eine Kraft übertragen wird, folgt aber auch daraus, daß in die Wirbel Energie gesteckt werden muß. Um die Strömung stationär zu halten, muß man Arbeit leisten. Das ist die eigentliche Ursache des Strömungswiderstandes.

Für das Experiment wichtig ist die in der Kopie mit (3.54) nummerierte Gleichung für die Widerstandskraft nach Newton,

$$F_w = \frac{1}{2} c_w \rho A u^2, \quad (4)$$

wobei ρ die Dichte des strömenden Mediums, u dessen Geschwindigkeit, A die Querschnittsfläche des umströmten Gegenstandes und c_w der Widerstandsbeiwert des Körpers ist.

c_w hängt stark von der Form und von der Oberfläche des Körpers ab. Daher ist die Ermittlung des Widerstandsbeiwertes in der Praxis von großer Bedeutung, z. B. beim Fahrzeugbau. Man wünscht sich in der Regel einen möglichst kleinen c_w -Wert, um möglichst wenig „Windwiderstand“ überwinden zu müssen. An den anderen Parametern in Gleichung (4) kann oder will man wenig ändern. Deshalb soll noch ganz kurz auf diesen Parameter c_w näher eingegangen werden.

Der Widerstandsbeiwert c_w stellt keine „echte“

Konstante eines Körpers dar, wie man an Abbildung (4) erkennt. Dort ist der c_w -Wert für eine Kugel gegen die sogenannte **Reynoldszahl** (Re) dargestellt. Letztere wird bekanntlich durch

$$Re = \frac{L \rho u}{\eta} \quad (5)$$

definiert, wobei L eine charakteristische Abmessung des betrachteten Körpers ist, z. B. der Durchmesser einer Kugel. η ist die Viskosität. Deutung und Bedeutung der Reynoldszahl entnehmen Sie bitte einem Lehrbuch, an dieser Stelle sind nur drei Punkte diskussionswürdig:

- 1) Die Reynoldszahl hängt von der Geschwindigkeit der Strömung ab, nach Abbildung (4) also auch c_w . Keine „gute“ Konstante tut das.
- 2) Re gibt ein ungefähres Maß dafür ab, ab wann c_w näherungsweise konstant ist. Gleichung (4) gibt dann die richtige Abhängigkeit von der Geschwindigkeit wieder. Abbildung (4) zeigt, dass dies für eine Kugel etwa ab $Re = 10^3$ bis 10^5 gilt. In diesem Bereich befindet man sich in vielen Situationen – daher die Bedeutung von c_w z. B. beim Automobilbau.
- 3) Die Reynoldszahl ist die geeignete Größe, um die hydrodynamische Ähnlichkeit zwischen

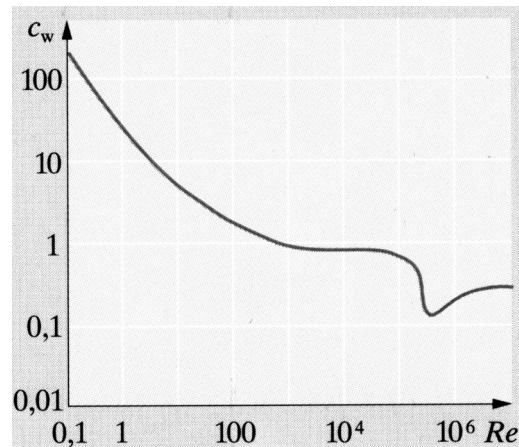


Abbildung 4: Widerstandsbeiwert als Funktion der Reynoldszahl für eine Kugel (aus Gerthsen, Physik). Beachten Sie die doppeltlogarithmische Auftragung. Der „Schlenker“ zwischen $Re = 10^5$ und 10^6 wird im Gerthsen erklärt und ist hier nicht relevant.

tatsächlichem Aufbau und Modell zu prüfen. Üblicherweise testet man die „Windschlüpfrigkeit“ eines Fahrzeugs zuerst an einem verkleinerten Modell der Abmessung L_M . Vergrößert man die geplante Einsatzgeschwindigkeit u des Fahrzeugs der Größe L_F beim Modellversuch um den Faktor L_F/L_M , so hat man die gleiche Reynoldszahl vorliegen, siehe Gleichung (5), und misst daher den „richtigen“ c_w -Wert.

1.8 Auftrieb und Lilienthalsches Polardiagramm

Bei einem Tragflügel entsteht bekanntlich der Auftrieb dadurch, dass sich eine Zirkulationsströmung um den Flügel mit der linearen Strömung überlagert. Der Drehsinn ist so, dass oberhalb des Flügels eine höhere Geschwindigkeit u herrscht als unterhalb. Nach Bernoulli ergibt dies eine Auftriebskraft F_A . Genauer kann im **Bergmann-Schaefer** (Band 1) nachgelesen werden.

Man kann nun zeigen, dass man einen zu Gleichung (4) äquivalenten Ausdruck für F_A gewinnen kann, nämlich

$$F_A = \frac{1}{2} c_A \rho A u^2 . \quad (6)$$

Beide Größen, F_A und F_W hängen vom Anstellwinkel α zwischen Strömungsrichtung und Achse des Tragflächenprofils ab. Es ist klar, dass insbesondere für einen Gleitflug das Verhältnis F_A/F_W



Abbildung 5: Aufbau zur gleichzeitigen Messung von Auftriebs- und Widerstandskraft.

von besonderem Interesse ist. Dies hat natürlich auch Altmeister Lilienthal interessiert und eine Auftragung von F_A gegen F_W wird **Lilienthalsches Polardiagramm** genannt². α ist dabei als Parameter zu betrachten. Anhand dieses Diagramms ist der Anstellwinkel für das maximale Verhältnis F_A/F_W ablesbar. Der Aufbau zur entsprechenden Messung ist in Abbildung (5) dargestellt. Der Flügel sitzt am Ende einer Stange, die kardanisches gelagert ist. Man nennt diesen Aufbau auch Zweikomponentenwaage (siehe **Bergmann-Schaefer**). Die Kopplung mit den Kraftsensoren (schwarze Zylinder) geschieht über Fäden. Ein Abtrieb (negativer Auftrieb) kann daher nur gemessen werden, wenn die Waage durch das Gegengewicht so eingestellt ist, dass sie

ohne Strömung am oberen Sensor zieht. Die bei ausgeschaltetem Gebläse entwickelte Kraft wird vom Gerät beim Einschalten in der Anzeige kompensiert (Tara-Funktion).

2 Das Diagramm hat nichts mit Polarkoordinaten zu tun, der Name ist irreführend (siehe **Bergmann-Schaefer**).

2 Aufgaben und Hinweise

2.1 Messung des Staudrucks für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten – Bestimmung der Luftdichte

Messen Sie am Ausgang des Gebläses vom Windkanal, Abbildung (3), für verschiedene Drehzahlen des Gebläsemotors abwechselnd die Strömungsgeschwindigkeit u der Luft mit dem Anemometer und den Staudruck p_{St} mit dem Digitalmanometer. Dieses zeigt den Druck in Pascal an.

Stellen Sie p_{St} gegen u^2 grafisch dar und bestimmen Sie aus der Steigung (lineare Regression) die Dichte der Luft.

Beachten Sie folgende Dinge bei der Durchführung:

- 1) Das Gebläse braucht einige Minuten bis es eine konstante Geschwindigkeit liefert. Am besten beginnen Sie bei voller Leistung.
- 2) Halten Sie die Mitte des Anemometers und das Ende der Drucksonde etwa an die gleiche Stelle. Klemmen Sie die Sonde am besten in einen Halter und stellen Sie diese immer an den gleichen Ort.
- 3) Der Staudruck schwankt aufgrund von Wirbelbildung. Daher wurde die Integrationszeit des Digitalmanometers auf 9 s eingestellt. Es wird also ein Mittelwert über 9 s angezeigt.
- 4) Variieren Sie die Strömungsgeschwindigkeit der Luft in Schritten von 1 m/s.

2.2 Bernoulli-Rampe

Setzen Sie die Bernoulli-Rampe in den Windkanal ein. Untersuchen Sie mit dem Staurohr, ob die Gleichung (3) erfüllt ist. Dazu messen Sie p_{St} an den auf der Rampe markierten Stellen.

Tragen Sie $\log p$ gegen $\log A$ auf und überprüfen Sie durch lineare Regression, ob Sie eine Gerade mit der Steigung -2 erhalten.

Zu beachten:

Die folgenden beiden Teilversuche 2.3 und 2.4 können jeweils nur an einem Versuchsaufbau durchgeführt werden. Der eine Teilversuch findet an dem Aufbau mit nur einem Kraftmesser, der andere an der Zweikomponentenwaage, Abbildung (5), statt.

2.3 Widerstandsbeiwerte

2.3.1 Messung von Widerstandsbeiwerten

Ersetzen Sie die Bernoulli-Rampe durch die plane Abdeckung des Windkanals. Stellen Sie eine Strömungsgeschwindigkeit von ca. 10 m/s ein (Anemometer). Achten Sie dabei darauf, dass der Gebläseausgang nur über einem begrenzten Bereich in der Mitte maximal bläst.

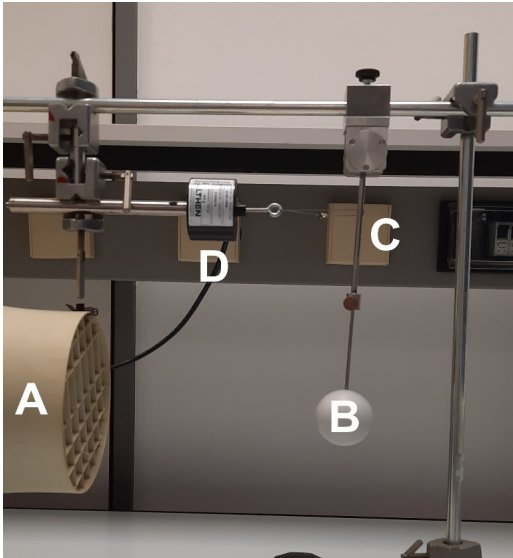


Abbildung 6: Aufbau zur Widerstandsmessung. A: Gebläse, B: Widerstandskörper (hier Kugel), C: Hebelarm mit Aufnahme für die Widerstandskörper, D: elektronischer Kraftmesser.



Abbildung 7: Zur Verfügung stehende Widerstandskörper.

Nun messen Sie mit dem in Abbildung (6) dargestellten Versuchsaufbau die in Abbildung (7) dargestellten Körper durch. Vergessen Sie nicht, die Hebelarme auszumessen.

Berechnen Sie mit Gleichung (4) die Widerstandsbeiwerte ($\rho_{\text{Luft}} = 1,2 \text{ kg m}^{-3}$). Vergleichen Sie mit den Werten, die in der nebenstehenden Tabelle angegeben werden.

Überprüfen Sie anhand der beiden Scheiben, ob das Verhältnis der Widerstandskräfte sich tatsächlich wie das der Scheibenflächen verhält; siehe Gleichung (4).

Schließlich erklären Sie anhand der Halbkugel-ergebnisse die Funktionsweise des Anemometers.

(Nicht alle rechts aufgeführten Körper sind beim Versuch vorhanden.)

	Platte	c_w 1.1-1.3
	langer Zylinder	0.35-1.2
	Kugel	0.18-0.45
	Halbkugel	mit Boden 0.4 ohne Boden 0.34
	Halbkugel	mit Boden 1.2 ohne Boden 1.3
	Kegel mit Halbkugel	0.16-0.2
	Halbkugel mit Kegel	0.07-0.09
	Stromlinienkörper	0.055

Abbildung 8: Luftwiderstandsbeiwerte ausgewählter Körper.

2.3.2 Zusammenhang zwischen Widerstand und Geschwindigkeit

Prüfen Sie für die kleine Platte, ob die Abhängigkeit des Widerstandes vom Quadrat der Geschwindigkeit nach Gleichung (4) gegeben ist. Messen Sie dazu mit einigen verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Durch Auftragung F gegen u^2 kann nach Gleichung (4) durch lineare Regression erneut c_w für die Scheibe bestimmt werden. Dieses Ergebnis sollte genauer sein als die vorherige Messung an einem Punkt.

Ermitteln Sie die minimale und die maximale Reynoldszahl unter den verwendeten Widerstandskörpern mithilfe des Durchmessers als Längenparameter. Sie können dann abschätzen, ob Gleichung (4) überhaupt gültig sein sollte (Gilt $10^5 > Re > 10^3$, siehe Abbildung (4)? Bei 20°C gilt $\eta_{\text{Luft}} \approx 10^{-5} \text{ Pa s}$.

2.4 Messungen des Auftriebs eines Tragflügels

Bestimmen Sie die Auftriebskraft F_A und die Widerstandskraft F_W eines Tragflügels als Funktion des Anstellwinkels α (zwischen -10° und ca. 30° in Schritten von $2,5^\circ$) bei maximaler Gebläseleistung.

Tragen Sie F_A gegen F_W auf, fertigen Sie also ein Lilienthalsches Polardiagramm (**Bergmann-Schaefer**) an. Ermitteln Sie aus diesem Diagramm grafisch denjenigen Anstellwinkel α , bei dem das Verhältnis F_A/F_W am größten wird.

Da es nur auf das Verhältnis F_A/F_W ankommt, brauchen die Hebelarme hier nicht berücksichtigt zu werden.