

Auswerteprotokoll des Windversuches

Markus Engelhardt

2005-05-31

Versuchsort: Keller und Dach des Physikhochhauses

Versuchstag: 2005-05-18

Versuchszeit: 14:30 bis 17:30 Uhr

Betreuer: Markus Hasel

Die Durchführung des Versuches erfolgte gemeinsam mit *Katrin Zink*

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Einführung	3
2	Fragen	3
2.1	.....	3
2.2	.....	3
2.3	.....	3
2.4	.....	4
3	Aufgaben	4
3.1	.....	4
3.2	.....	5
3.3	.....	5
4	Durchführung des Versuches und Auswertung	6
4.1	.....	6
4.2	.....	8
4.3	.....	10
4.4	.....	10
4.5	.....	12

1 Allgemeine Einführung

siehe Beschreibung zum Versuch Wind!

2 Fragen

2.1

- Die theoretische Anlaufschwelle eines Schalenanemometers ist diejenige Geschwindigkeit, welche sich aus dem Ordinatenabschnitt der Kalibrierungskurve ergibt.
- Die tatsächliche Anlaufschwelle ist hingegen genau die Windgeschwindigkeit, bei der das Anemometer beginnt sich zu drehen, wenn z.B. im Windkanal die Windgeschwindigkeit langsam hochgeregelt wird.
- Die Anlaufträgheitslänge ist ein Maß dafür, wie schnell sich ein Anemometer einer Windgeschwindigkeit anpasst. Sie ist das Produkt aus der Trägheitszeit und dem Betrag der Windgeschwindigkeit. Die Trägheitslänge ist nicht geschwindigkeitsabhängig und somit nur von der Konstruktion des Messgerätes abhängig.
- Die Auslaufträgheitslänge ergibt sich aus den unterschiedlichen Widerstandsbeiwerten für die konvexen und die konkaven Seiten der Schalen.
- Das so genannte overspeeding ist die Konsequenz der höheren Auslaufträgheitslänge im Vergleich zur Anlaufträgheitslänge. Dies bedeutet, dass bei wechselnder Windstärke das Anemometer im Mittel eine zu hohe Windgeschwindigkeit anzeigt.

2.2

Typische Größenordnungen für ein gutes Schalenanemometer sind:

$0,25 \frac{m}{s}$ für die Anlaufschwelle,

ein bis zwei Meter für die Anlaufträgheitslänge und

mindestens $40 \frac{m}{s}$ für die maximal erfassbare Windgeschwindigkeit.

2.3

Das Prantlsche Staurohr besteht aus einem Pitotrohr und einer Drucksonde, die gegeneinander geschaltet sind. Das Pitotrohr misst den Gesamtdruck, während von der Drucksonde der statische Druck aufgenommen wird. Die aufgenommene Druckdifferenz entspricht gerade dem dynamischen Druck (Staudruck). Diese Differenz wird mit einem Manometer aufgenommen, welches dafür sorgt, dass die Empfindlichkeit des Staurohres vergrößert wird.

Bei der Windmessung zeigt das Pitotrohr in die Richtung aus der der Wind weht; die Öffnungen für die Drucksonde sind im rechten Winkel dazu angebracht.

2.4

a) Für die Bestimmung der Windgeschwindigkeit mittels dem Prantlschen Staurohr benötigt man die Bernoulli-Gleichung.

b) Sie lautet:

$$p + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 = p_0 = \text{constant}$$

- c) Der erste Term (p) stellt den statischen Druck dar, der zweite Term (ρgh) den Schweredruck, wobei g die Erdbeschleunigung, ρ die Dichte des betrachteten Mediums und h die Höhe ist und der dritte Term ($\frac{1}{2}\rho v^2$) den dynamischen Druck, wobei v die Geschwindigkeit des strömenden Mediums ist.
- d) Der erste Term beschreibt den Luftdruck, der bei Windstille herrschen würde, der zweite Term die Höhenkorrektur und der dritte Term stellt die durch den Wind erzeugten zusätzlichen Druck dar.
- e) Da die Vertikalkomponente des Windvektors klein gegenüber den horizontalen Komponenten ist, erfährt die Strömung kaum eine Höhenänderung. Deshalb wird bei der Anwendung für das Prantlsche Staurohr der zweite Term der Bernoulli-Gleichung Null gesetzt.

3 Aufgaben

3.1

Berechnung des Halbstundenmittelwertes für Windgeschwindigkeit und Windrichtung aus den in der Versuchsbeschreibung angegebenen Werten (Datum: 1994-08-03; Zeit: 00:00 bis 00:30).

	<u>mittlere Windgeschwindigkeit</u>	<u>mittlere Windrichtung</u>
<u>Skalares Mittel:</u>	4.2 $\frac{m}{s}$	269.09 Grad
<u>Vektoriellles Mittel:</u>	4.2 $\frac{m}{s}$	271.36 Grad

Die Windrichtung entspricht einem fast exakten Westwind.

3.2

- a) In der Meteorologie sind verschiedene Skalenbereiche bzw. Größenordnungen definiert worden, auf denen atmosphärische Phänomene betrachtet werden. Mesoskalige atmosphärische Phänomene haben dabei eine horizontale Erstreckung zwischen 2 und 2000 Kilometern.
(vgl. Wetterlexikon von <http://www.top-wetter.de>)
- b) Das Gelände des Standortes sollte eben und frei von Hindernissen sein, damit die vom Boden erzeugten Turbulenzen die Windgeschwindigkeitsmessung nicht beeinflussen.
- c) Das Anemometer wird international einheitlich 10 Meter über Grund montiert.
- d) Der Abstand zu einem Hindernis sollte mindestens zehn mal so groß sein wie seine Höhe.
- e) Am besten eignet sich natürlich das Ultraschallanemometer, da es auch sehr turbulente Windverhältnisse sehr genau erfassen kann. Jedoch stehen sein hoher Wartungsaufwand und die ungleich höheren Kosten im Vergleich zum Schalensternanemometer oft nicht im Verhältnis zum gewünschten Projekt, sodass wohl auch in dieser Fragestellung, in der viele Messgeräte erforderlich sind, Schalensternanemometer mit Windrichtungsgeber zum Einsatz kommen würden.
- f) Eine gute Mittelungszeit würde ein 10 Minuten-Mittel darstellen, da dies ein guter Kompromiss zwischen einer unübersichtlichen und unnötigen Datenflut und einem Verlust von wichtigen Daten aus lokalen Wetterereignissen ist.
Daneben ist auch empfehlenswert die in diesem Zeitraum erreichte maximale Windgeschwindigkeit zu messen, damit auch kurze Windböen erfasst werden.

3.3

Die Bestimmung der Windgeschwindigkeit beim Ultraschallanemometer ist nur von der geometrischen Lauflänge und dem Kehrwert der Laufzeitdifferenz abhängig und ist somit temperaturunabhängig:

$$\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} = 2 \frac{u}{d}$$

Dabei ist t_2 die Laufzeit des Schalles in Gegenwindrichtung, t_1 seine Laufzeit in Windrichtung, u die Windgeschwindigkeitskomponente und d die geometrische Laufweglänge.

4 Durchführung des Versuches und Auswertung

Die während des Versuches im Keller des Physikhochhauses herrschenden Umgebungsbedingungen sind für die Lufttemperatur $T = 23^\circ\text{C}$ und für den Luftdruck $p_0 = 1010 \text{ hPa}$.

Die Luftdichte ergibt sich aus der Gasgleichung zu $\rho_L = \frac{p_0}{RT} = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

(Der Luftdruck ergibt sich aus dem Wert vom Dach, der mit $p_D = 1003 \text{ hPa}$ von der Wetterstation gemessen worden ist, und der Umrechnung $p_0 = p_D + \rho_L \cdot g \cdot \Delta z = 1010 \text{ hPa}$, wobei ρ_L die als konstant angesetzte Luftdichte, g die Erdbeschleunigung und $\Delta z \approx 60 \text{ m}$ der Höhenunterschied zwischen dem Messgerät auf dem Dach und dem Versuchraum sind.)

4.1

Im ersten Versuch wird die Winkelabhängigkeit des Prantlschen Staurohres (Gerätenummer: MIK B768) untersucht.

Dazu wird mit Hilfe eines Windkanales ein konstanter Luftstrom in der Größenordnung von 4 bis 5 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ erzeugt. Als Referenzmessgerät dient ein Hitzdrahtanemometer (Inventarnummer: 89062). Mit diesem wird eine Windgeschwindigkeit von 4,5 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ registriert. Anschließend wird das Staurohr 10 bis 20 cm vor der Windkanalauslassenebene montiert und daran die Schlauchverbindungen eines Manometers angeschlossen. Die Öffnung des Staurohres wird direkt in Windrichtung gedreht. Am Manometer wird daraufhin die Höhenänderung des sich darin befindlichen Methanols notiert. Um für die Aussagekraft der Winkelabhängigkeit ausreichend viele Messpunkte zu erhalten wird das Staurohr in beide Richtungen an 11 Messunkte gedreht und die jeweilige Höhenänderungen des Methanols zu dessen Nullpunkt (Höhe bei Windstille) abgelesen.

Die daraus gewonnenen Werte sind dem Messprotokoll zu entnehmen.

Die zugehörige Windgeschwindigkeit berechnet sich aus den abgelesenen Höhenänderungen der Methanolsäule des Manometers wie folgt :

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_L v^2 = \rho_M \cdot g \cdot \Delta h \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{\rho_M \cdot g \cdot \Delta h \cdot 2}{\rho_L}}$$

Hierbei ist Δp die Druckänderung im Staurohr, $\rho_L = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ für den Versuchsraum bestimmte Luftdichte, $\rho_M = 786,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ die Dichte des Methanols, v die gemessene Windgeschwindigkeit, g die Erdbeschleunigung und Δh die Höhenänderung der Methanolsäule.

Damit ergibt sich der in der folgenden Tabelle aufgelisteter Zusammenhang für die Winkelabhängigkeit des Prantlschen Staurohres:

(Die negativen Gradangaben beziehen sich dabei auf eine Linksdrehung.)

Winkel (<i>in Grad</i>)	gemessene Windgeschwindigkeit v (<i>in $\frac{m}{s}$</i>)
-90	4,8
-80	4,4
-70	3,5
-60	1,7
-50	2,6
-40	3,9
-30	4,6
-20	4,9
-15	5,0
-10	5,0
-5	5,0
0	5,0
5	5,0
10	4,9
15	4,9
20	4,9
30	4,3
40	3,3
50	1,4
60	2,9
70	4,1
80	5,1

Das Ergebnis wird graphisch veranschaulicht (siehe Anhang!).

Es zeigt sich, dass das Staurohr bis zu einer Abweichung von 20° in beide Richtungen fast den gleichen Wert für die Windgeschwindigkeit liefert. Dieser Wert liegt mit $5,0 \frac{m}{s}$ um $0,5 \frac{m}{s}$ oder 10 % höher als der mit dem Hitzdrahtanemometer gemessene Wert. Dies lässt auf die Ungenauigkeit des Hitzdrahtanemometers schließen. Eine weitere Fehlerquelle ist, dass die Windgeschwindigkeit gemessen worden ist nicht genau an der Stelle gemessen worden ist, an der das Staurohr platziert ist.

Mit betragsmäßig zunehmenden Winkeln nimmt die gemessene Windgeschwindigkeit deutlich ab und erreicht ihr Minimum im Bereich von 50° bis 60° . Mit betragsmäßig weiter zunehmenden Winkeln nimmt sie wieder zu, und erreicht im rechten Winkel wieder in etwa den ursprünglichen Wert. Dies bedeutet, dass das man mit dem Prantlschen Staurohr auch senkrecht zur Windrichtung dessen Geschwindigkeit messen könnte. Jedoch ist hier die Messung nicht sehr zuverlässig und bereits geringe Änderungen des Winkels führen zur Verfälschung des Ergebnisses.

Zusammenfassend lässt sich über das Prantlsche Staurohr aussagen, dass es eine sehr zuverlässige Windgeschwindigkeitsmessung ermöglicht, sofern der Wind konstant aus einer Richtung weht. Deshalb werden derartige Messgeräte im Wesentlichen zur Kalibrierung im Windkanal verwendet, da sie selbst Absolutmessgeräte sind und nicht kalibriert werden müssen.

4.2

In diesem Versuch wird die Kalibrierkurve des Welleranemometers (Inventarnummer: 79074) bestimmt.

Hierzu wird das Welleranemometer zusammen mit dem Prantlschen Staurohr vor dem Windkanal positioniert, ohne dass sie sich gegenseitig beeinflussen. Das Staurohr wird hier als Bezugsmessgerät benutzt. Als Referenzgerät für die Strömungsgeschwindigkeitsänderung dient das Hitzdrahtanemometer.

Nun wird der Luftstrom stufenweise erhöht und jeweils dessen Geschwindigkeit durch das Hitzdrahtanemometer gemessen und die Methanolsäulenhöhenänderung, die durch das Staurohr hervorgerufen wird, abgelesen und notiert (siehe Messprotokoll!). Die Spannung U , die durch das Drehen der Flügel des Welleranemometers entsteht, wird durch einen x-y-Schreiber (Inventarnummer: 950061) einige Sekunden aufgezeichnet (siehe Anhang!). Dies erlaubt den leicht schwankenden Spannungsverlauf zu mitteln und somit eine größere Genauigkeit zu erreichen.

Folgende Messwerte werden hierbei erzielt:

Messnummer	v (Hitzdraht) in m/s	v (Staurohr) in m/s	Spannung U (in Volt)
1	1,65	1,8	0,56
2	2,3	2,5	0,80
3	3,3	3,7	1,15
4	4,5	5,0	1,54
5	7,2	7,9	2,40
6	10,1	10,6	3,23
7	16,4	17,0	5,20
8	1,02	1,3	0,35
9	0,7	0,9	0,23

Aus diesen Messwerten lässt sich die Kalibrierkurve des Welleranemometers bestimmen. Dazu werden die Werte graphisch veranschaulicht (siehe Anhang!). Aus der Ausgleichsgeraden der Messwerte ergibt sich zwischen der angegebenen Spannung U und der Windgeschwindigkeit v folgender Zusammenhang:

$$v = 3,27 \frac{m}{Vs} \cdot U + v_0$$

Der Term v_0 beschreibt die theoretische Anlaufschwelle des Welleranemometers. Für sie gilt: $v_0 = 0,03 \frac{m}{s}$

Der sehr hohe Korrelationskoeffizient von $R^2 = 0,9998$ weist auf eine sehr gute Übereinstimmung der Messwerte mit dieser Gleichung hin. Der sehr niedrige Wert der theoretischen im Vergleich zur tatsächlichen Anlaufschwelle lässt darauf schließen, dass die Haftreibung des Anemometers sehr hoch ist.

Zur Bestimmung der Empfindlichkeit eines Messgerätes wird der Quotient aus der Anzeigenänderung und der Messgrößenänderung gebildet. Im vorliegenden Fall ist dies gerade der Kehrwert der Steigung aus der Kalibrierkurve.

Somit folgt für die Empfindlichkeit S des Welleranemometers:

$$S = 0,31 \frac{Vs}{m}$$

Beim Vergleich des Welleranemometers mit dem Hitzdrahtanemometer fällt ein systematischer Unterschied auf. Die graphische Veranschaulichung bestätigt diesen Verdacht (siehe Anhang!). So weist das Hitzdrahtanemometer einen

um 3 % niedrigeren Wert auf. Hinzu kommt noch eine absolute Abweichung von $0,24 \frac{m}{s}$, die ebenfalls zu niedrigeren Werten führt.

Ursache hierfür kann ein falsch kalibriertes Hitzdrahtanemometer sein, oder systematische Messfehler.

4.3

Jetzt soll die tatsächliche Anlaufschwelle des Welleranemometers bestimmt werden.

Hierzu wird die Geschwindigkeit des Luftstromes aus dem Windkanal ausgehend von völliger Ruhe sehr langsam gesteigert. Sobald der sich im Luftstrom befindliche Welleranemometer eine vollständige Umdrehung zu absolvieren in der Lage ist, wird die Erhöhung gestoppt und die Windgeschwindigkeit mit Hilfe des Hitzdrahtanemometers gemessen.

Dieser Vorgang wird anschließend zwecks größerer Genauigkeit zweimal wiederholt. Aus den gewonnenen Daten wird der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung gebildet.

Somit ergibt sich für die tatsächliche Anlaufschwelle des Welleranemometers:

$$v = (0,72 \pm 0,03) \frac{m}{s}$$

Der statistische Fehler ist trotz dem geringen Messumfang gering, der systematische Fehler, der nur grob geschätzt werden kann, wird jedoch mit $0,1 \frac{m}{s}$ angegeben. Vor allem das Stoppen der Erhöhung der Windgeschwindigkeit ist sicherlich nicht rechtzeitig einzustellen, sodass immer ein etwas zu hoher Wert eingestellt ist.

Typische tatsächliche Anlaufschwellen von guten Propelleranemometern liegen in der Größenordnung von etwa $0,25 \frac{m}{s}$, sodass es sich hierbei um ein relativ schlechtes Messgerät handelt.

4.4

Nun wird die Anlauf- und die Auslaufräheitslänge des Welleranemometers bestimmt.

Die Trägheitslängen sind das Produkt aus Trägheitszeit und Windgeschwindigkeit. Die Windgeschwindigkeit wird konstant auf $v = 4,4 \frac{m}{s}$ gehalten. Zur Bestimmung der Anlaufträheitszeit L wird das an den x-y-Schreiber angeschlossene Welleranemometer in den Luftstrom gebracht, wobei jedoch per Hand die Flügel in Ruhe gehalten werden. Durch plötzliches Loslassen der Flügel beginnt sich das Welleranemometer zu drehen. Aus der sich dadurch ergebenden Spannungskurve lässt sich die Anlaufträheitszeit τ er-

mitteln. Sie ergibt sich aus der Zeitspanne, in der die Spannungsdifferenz eines beliebigen Wertes und des gemittelten Endwertes auf das $\frac{1}{e}$ - fache absinkt.

Aus drei durchgeführten Messreihen ergeben sich somit folgende Ergebnisse:

1. Messreihe: $\tau_1 = 0,3 \text{ s} \Rightarrow L_1 = \tau_1 \cdot v = 1,32 \text{ m}$
2. Messreihe: $\tau_2 = 0,4 \text{ s} \Rightarrow L_2 = \tau_2 \cdot v = 1,76 \text{ m}$
3. Messreihe: $\tau_3 = 0,3 \text{ s} \Rightarrow L_3 = \tau_3 \cdot v = 1,32 \text{ m}$

Als Mittelwert ergibt sich für die Anlaufträgheitslänge ein Wert von

$$L = (1,47 \pm 0,25) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Der größte systematische Fehler liegt offenbar beim Ablesen der Trägheitszeit aus der Kurve. Bei einer Unschärfe von 0,1 Sekunden ergibt sich ein Fehler von 0,44 m!

Ein weiterer systematischer Fehler liegt beim x-y-Schreiber, über dessen Trägheit keine Aussage getroffen werden kann.

Das Ergebnis liegt im Rahmen eines guten Messgerätes von dem Anlaufträgheitslängen in der Größenordnung von 1 bis 2 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ zu erwarten sind.

Zur Bestimmung der Auslaufträgheitszeit L' wird das Anemometer in den Luftstrom gehalten, bis sich seine Geschwindigkeit der des Luftstromes angepasst hat. Anschließend wird es plötzlich aus dem Einflussbereich des Windkanales gebracht. Dabei ist zu beachten, dass das Anemometer senkrecht aus den Luftstrom bewegt wird, um kein zusätzliches Drehmoment durch die Bewegung zu erzeugen.

Die Auslaufträgheitszeit τ' ergibt sich analog zu Anlaufträgheitszeit aus den drei durchgeführten Messreihen.

Hier ergaben sich folgende Ergebnisse:

1. Messreihe: $\tau'_1 = 2,0 \text{ s} \Rightarrow L'_1 = \tau'_1 \cdot v = 8,8 \text{ m}$
2. Messreihe: $\tau'_2 = 1,7 \text{ s} \Rightarrow L'_2 = \tau'_2 \cdot v = 7,48 \text{ m}$
3. Messreihe: $\tau'_3 = 1,6 \text{ s} \Rightarrow L'_3 = \tau'_3 \cdot v = 7,04 \text{ m}$

Als Mittelwert ergibt sich für die Auslaufträgheitslänge ein Wert von

$$L' = (7,77 \pm 0,92) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die Fehlerbetrachtung ist hier analog zur Anlaufträgheitslänge. Somit ist auch hier von einer Unschärfe von $\pm 0,44 \text{ m}$ auszugehen.

Wie erwartet ist die Auslaufträgheitslänge deutlich größer als die Anlaufträgheitslänge.

4.5

Im abschließenden Versuch wird das Hitzdrahtanemometer mit dem Schalensternanemometer verglichen. Dazu wird der Wind auf dem Dach des Physikhochhauses mit beiden Messgeräten gleichzeitig gemessen und mit dem x-y-Schreiber auf demselben Blatt synchron aufgezeichnet (siehe Anlage!). Beim Vergleich der beiden Kurven fällt sofort die kurze Ansprechschwelle des Schalenanemometers auf, während das Hitzdrahtanemometer nur über den Zeitraum von einer Sekunde gemittelte Werte ausgibt. Bei schneller Änderung der Windgeschwindigkeit kann das Schalensternanemometer auf Grund seiner höheren Trägheitszeit nicht so schnell darauf reagieren. Dies gilt vor allem bei plötzlichem Abflauen des Windes, wodurch sich das so genannte *overspeeding* ableitet.

Leider kann dieser Effekt bei diesem Versuch nicht immer deutlich veranschaulicht werden, was an verschiedenen Störeffekten liegt. So ist das Hitzdrahtanemometer sehr stark richtungsabhängig und kann bei leichten Abweichungen während der Messung ein völlig verfälschtes Bild der Windgeschwindigkeitsverteilung wiedergeben. Weitere Fehlerquellen sind bei diesem Versuch Windabschattungen der Messpersonen und somit unterschiedliche Windverhältnissen an den beiden Messgeräten.