

GESCHWINDIGKEIT EINES WINDKANALS NACH BETZ MIT LASERTRIANGULATION

- vergleichende Messungen -

W. Send, ANIPROP GbR
Sandersbeek 20, D-37085 Göttingen

Zusammenfassung

Die Abweichungen bei Anemometern unterschiedlicher Hersteller in ein- und demselben Windkanal sind Auslöser der Arbeit gewesen. Als Grund für diese Abweichungen werden trotz hoher Messgenauigkeit mit LDA gestützter Kalibrierung unterschiedliche Referenzgeschwindigkeiten gesehen. Berichtet wird über ein Manometer nach Betz. Das neue Verfahren ermittelt den Pegel des Sperrfluids mit einem Lasertriangulations-sensor. Messungen werden in einem Testwindkanal in der Bauweise nach Eiffel durchgeführt, dessen Wanddruck in die Kanalgeschwindigkeit umgerechnet wird. Ziel ist die Bestimmung der absoluten Kanalgeschwindigkeit. Hierfür ist ein theoretisches Modell der Berechnung auf algebraischer Grundlage entwickelt worden. Das Modell gestattet eine vollständige Fehleranalyse aller wesentlichen Variablen und somit eine Bewertung ihres Einflusses auf die Genauigkeit der Messung. Zugleich ist die numerische Untersuchung der Innenströmung in Angriff genommen worden.

1. EINLEITUNG

Die Ermittlung von Luftgeschwindigkeiten spielt seit dem Bau der ersten großen Windkanäle durch Gustave Eiffel in Paris und Ludwig Prandtl in Göttingen eine zentrale Rolle für die experimentelle Aerodynamik. Die Namen stehen zugleich für die beiden prinzipiell unterschiedlichen Konzepte dieser Versuchseinrichtungen. Bei ersterer Anordnung wird die Luft durch große mechanische Gleichrichter und Siebe angesogen, der Luftstrom kontrahiert und durch die Messstrecke geführt. Dadurch wird ein

gleichmäßiges und turbulenzarmes Strömungsprofil im Kanal ohne großen Aufwand erzielt. Der Antrieb mit seinen rotierenden Schaufeln bläst die Luft in die Umgebung zurück. Die Rückführung der Strömung in einem Kreislauf beim Kanal Göttinger Bauart spart viel Energie, verlangt aber aufwändige Maßnahmen zur Glättung der Strömung nach der Beschleunigung durch die Antriebsschaufeln. Es soll erwähnt sein, dass auch beim Eiffelkanal in einem Laborraum die Luft zumeist nicht gänzlich störungsfrei eingesogen werden kann. Die Frage der Rückströmung wird nur in der zugehörigen Präsentation diskutiert.

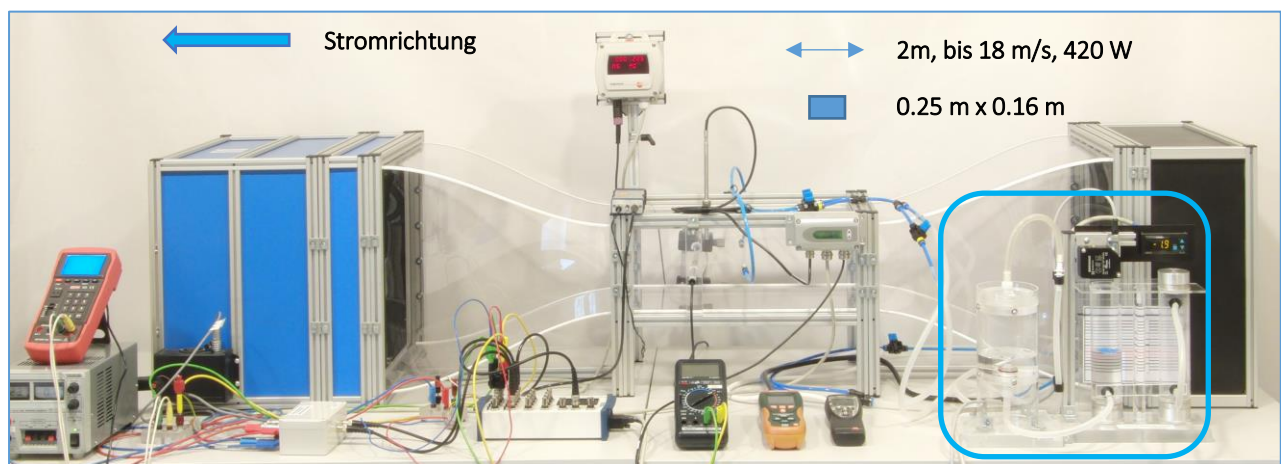


Bild 1. Testkanal ANIPROP TWK2S.

Von links nach rechts: Antrieb mit Aufweitung, Messstrecke mit mehreren Sensoren, Einlass und Kontraktion der Strömung, Manometer nach Betz (rechts im blauen Rahmen).

Das Manometer hat vor der Entwicklung von Laser-Doppler-Anemometry (LDA) und Particle-Image-Velocimetry (PIV) die zentrale Funktion gehabt, über die Druckdifferenz die Geschwindigkeit bestimmen zu können. Physikalischer Kern ist die Bestimmung des Druckunterschieds an den beiden Seiten eines U-Rohres aus der Masse der Flüssigkeitssäule, die zwischen den Pegeln in den beiden Schenkeln enthalten ist. Basis der Auswertung ist ein erstes Integral des Impulserhaltungssatzes, das zumeist *Bernoulli-Gleichung* - in seiner einfachen Form auch Manometergleichung - genannt wird. Da diese Gleichung ebenso für instationäre und kompressible Strömungen hergeleitet werden kann, spielt sie auch in der theoretischen Aerodynamik eine wichtige Rolle. Dient die Bernoulli-Gleichung in der theoretischen Aerodynamik dem Ziel, zu berechneter Geschwindigkeit den Druck an einem Ort zu ermitteln, so dient sie in der experimentellen Aerodynamik dem gegenläufigen Zweck, aus der Druckdifferenz die Geschwindigkeit zu bestimmen.

Das Betz Manometer zeichnet sich durch die Besonderheit zweier ungleicher Schenkel aus, die zum Ausgleichen und Messen dienen. Der deutlich kleinere Querschnitt des Messteils führt zur Verlagerung der Pegeldifferenz zu dessen Schenkel hin. Schon Albert Betz hat diese spezielle Ausführung von Manometern zur Verwendung in Windkanälen als Mikromanometer bezeichnet [1]. Die optische Projektion der Schwimmerskala im Messrohr führt zu einer hohen Ablesegenauigkeit von 1 bis 2 Pa [2]. Die praktische Erreichbarkeit dieser Messgenauigkeit wäre noch einmal zu prüfen. Zu vermerken ist, dass auch für dieses Projektionsmanometer nach Betz ein zusätzliches Eichverfahren entwickelt worden war.

Zu unterscheiden sind die *Messtechnik*, eine physikalische Größe mit einem Messgerät bei einer angegebenen *Genauigkeit* zu bestimmen und die *Eichung* dieses Messgerätes, die dessen Genauigkeit nachprüfbar sichert.

Die vorliegende Arbeit verfolgt die Bestimmung der Geschwindigkeit in der Messstrecke eines Eiffelkanals mit der Messtechnik des Manometers. Die Genauigkeit der Messung kann auf der theoretischen Grundlage der vollständigen Beschreibung der Anordnung über eine Fehlerrechnung ermittelt werden. Die Eichung des Messverfahrens wäre ein weiterer Schritt, der über das Ziel der Arbeit hinausgeht. In diesem Kontext wird nachfolgend der metrologische Hintergrund genauer beschrieben. Dabei zeigt sich, dass die Verwendung des Mikromanometers im Grenzbereich der Verfahren liegt, die für eine Eichung nach dem Stand der Technik verwendet werden dürfen. Diese Arbeit wirbt

dafür, das Messverfahren für den Zweck der Eichung einer erneuten Bewertung zu unterziehen.

Zum einen entfällt mit der Lasertriangulation das Problem der mühsamen und subjektiver Wahrnehmung unterliegenden optischen Auswertung der Pegeldifferenz. Zum anderen beruht das Verfahren auf elementaren Gesetzmäßigkeiten, die seinen Einsatz im Vergleich zu den erwähnten Verfahren LDA und PIV weniger aufwändig und leichter nachvollziehbar gestalten.

2. MESSUNG DER GESCHWINDIGKEIT AUS METROLOGISCHER SICHT

Zuständig für Vereinbarungen über Messgrößen, deren Standards und die Qualifizierung von Messverfahren ist das *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) mit Sitz in Paris. Unter dem Dach des BIPM sind die nationalen Einrichtungen (Labore, Institute) für Metrologie zusammengeschlossen. Für Deutschland ist dies die Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB). Innerhalb des BIPM gibt es für die verschiedenen Bereiche *Consultative Committees*, zu denen wiederum verschiedene Arbeitsgruppen gehören. Die Messgröße Geschwindigkeit ist der *CCM Working Group on Fluid Flow* (WGFF) zugeordnet. Hinter der Abkürzung CCM verbirgt sich das *Consultative Committee für Mass and Related Quantities*.

Diese Erläuterungen verdeutlichen, dass auch für die *Strömungsgröße Geschwindigkeit* ein internationales Netz von metrologischen Forschungseinrichtungen besteht, welche die Standards für die Messung dieser Größe und die Eichung der hierfür gedachten Messgeräte definiert. Ein Beschluss der WGFF von 2012 definiert die drei Verfahren, die für die Rückführung von Messungen der Strömungsgeschwindigkeit auf SI-Einheiten definiert werden [3]:

1. Nutzung eines kalibrierten LDA-Systems als Bezugsnormale in einer Strömung (LDA-Kalibrierung mittels rotierender Scheibe als Geschwindigkeitsprimärnormal),
2. Nutzung mechanischer Verschiebe- oder Drehvorrichtungen zur Bewegung eines Anemometers durch ein ruhendes Medium (Erzeugung einer definierten Geschwindigkeit mittels Schlitten oder Rotationsarm) und
3. Nutzung einer Durchflussmesseinrichtung durch Kenntnis des Strömungsprofils über der Austrittsfläche einer Messdüse (Geschwindigkeitsbestimmung aus rückgeführter Volumendurchflussmessung).

Die Autorin und die beiden Autoren gehören der PTB an. Die Referenz liefert eine deutsche Übersetzung

der Kernpunkte des Beschlusses und ist aus der zitierten Arbeit wörtlich übernommen worden. Favorisiert wird in der Arbeit das LDA-Verfahren, weil es keinerlei Rückwirkung auf das Strömungsfeld hat. Diese Eigenschaft kommt allerdings auch dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren zu. Ist die Geschwindigkeit einmal bestimmt, lässt sich die stets eintretende Versperrung durch nachträglich eingeführte Sonden korrigieren.

- Wie schon bemerkt, wirbt die vorliegende Arbeit dafür, die Messung der Geschwindigkeit über die Wanddruckmessung in der Messstrecke eines Eifelkanals neu zu bewerten. Die Frage stellt sich dabei, ob sich diese Methode unter dem dritten Punkt einordnen lässt.

Dazu müssen die Versuchseinrichtung wie das hierfür gebaute Manometer mit Lasertriangulation zur Bestimmung der Pegeldifferenz sicherlich noch weiterentwickelt werden. Aber die Begleitung durch eine vollständig algebraisch formulierte Theorie der Messung wie durch strömungsmechanische Rechnungen (CFD) macht das Konzept zu einem hochinteressanten Forschungsobjekt.

3. INTERNATIONALE VERGLEICHE ZWISCHEN ANEMOMETERN

Zwei internationale Vergleiche von Strömungsmessungen mit Anemometern sollen an dieser Stelle erwähnt werden. Das erste Projekt im Rahmen von EURAMET (European Association of National Metrology Institutes) ist zeitlich das jüngere und vergleicht LDA- und Ultraschall-basierte Messungen [4]. Die Geschwindigkeiten bei dem Vergleich betragen 0.2 m/s bis 40 m/s. Die Unsicherheit beträgt 0.2 % bei LDA und 0.11 % bis 2.95 % bei Ultraschall.

Anmerkung. Internationale Vergleiche solcher Messungen stehen vor dem Problem, dass die einzelnen Einrichtungen jeweils ihre eigenen Messungen im Rahmen von definierten Genauigkeiten als „richtig“ ansehen. Die Entwicklung einer Methode, solche Messungen und ihre Ergebnisse untereinander bewerten und einordnen zu können, wird als *Key Comparison* (KC) bezeichnet. Es gibt internationale Vereinbarungen über solche Methoden, die komplizierte Algorithmen enthalten [e.g. 5].

Der erwähnte Vergleich ist noch keine solche KC, sondern nur eine *Regional Comparison*. Aber das Problem stellt sich auch schon hier.

Die zweite Arbeit demonstriert exemplarisch die Vorgehensweise in der Metrologie, zu international und wechselseitig anerkannten Standards zu kommen. An dem Projekt waren 12 Einrichtungen beteiligt, davon kamen 10 aus Europa sowie Japan und die U.S.A. [6]. Drei unterschiedlich große Flügelrad-Anemometer wurden nacheinander an alle 12 beteiligten Labore geschickt. Das Projekt erstreckte sich über mehrere Jahre (1996 – 1999).

Das große Instrument (*Macro* genannt), als eines von dreien hier ausgewählt, hat acht Flügel. Die maximale Geschwindigkeit beträgt 20 m/s. Jedes Gerät erzeugt einen Impuls p pro Flügel und pro Umdrehung, gemessen als Impulse pro Sekunde. Die Labore geben ihre Windgeschwindigkeiten V in m/s vor und messen die Impulse. Zu jeder Geschwindigkeit gehört eine so genannte *Anemometer Constant* C :

$$C = (p/s) / V \text{ mit } [C] = p/m, [V] = m/s$$

Wenn in allen Laboren die Sollgeschwindigkeit V genau gleiche Werte hätte, dann müssten die Konstanten $C(V)$ auf einer Linie liegen. Das ist aber nicht der Fall, wie die beiden folgenden Grafiken in Bild 2 zeigen. Die untere Grafik zeigt den obersten Bereich der oberen Grafik zwischen $C = 45 \dots 50$.

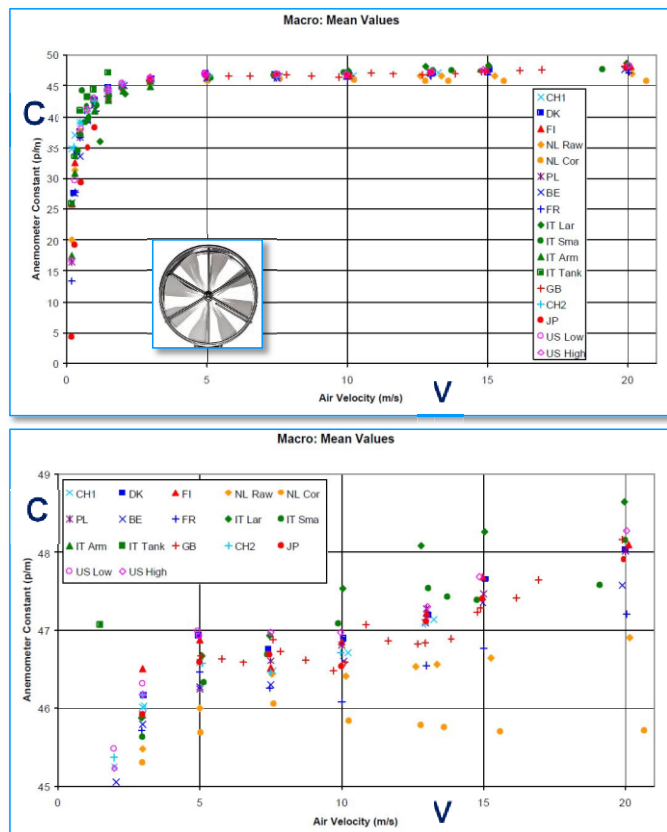


Bild 2. Anemometer Konstante $C(V)$ aus [6].

4. EIFFELKANAL MIT MANOMETER NACH BETZ

Die Bauweise des Eiffelkanals legitimiert den Ansatz der Stromfadentheorie, dass ein Partikel auf geschlossener Bahn durch den Kanal in den Außenraum gelangt und von dort wieder in den Kanal eintritt.

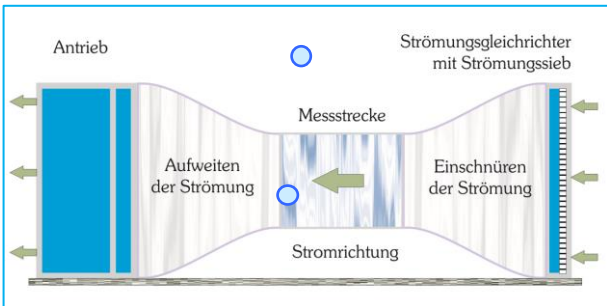


Bild 3. Prinzip des Eiffelkanals TWK2S mit zwei Luftpartikeln im Innern und im Laborraum.

Bild 3 zeigt das Prinzip des Eiffelkanals mit zwei Luftpartikeln, von denen das eine außerhalb des Kanals im Laborraum gedacht ist, das zweite innerhalb der Messstrecke. An diesen beiden Orten herrschen unterschiedliche Drücke, der Druck p_L im Laborraum und der Druck p_M in der Messstrecke. Dieser Druckunterschied wird mithilfe eines Manometers bestimmt, das nach Betz zwei Schenkel unterschiedlichen Durchmessers hat.

Der Schenkel mit dem größeren Durchmesser D_2 wird als Ausgleichsrohr bezeichnet und ist geschlossen. Die obere Öffnung führt über eine Schlauchleitung zur Kanalwand in der Mitte der Messstrecke. Im Innern herrscht folglich der Druck p_M . Der Schenkel mit dem kleineren Durchmesser D_1 dient als Messrohr und ist nach oben hin offen. In seinem Innern

herrscht der Druck p_L des Laborraums. Beide Gefäße sind mit destilliertem Wasser gefüllt und untereinander auf der Bodenseite verbunden. Auf der Oberfläche dieses Schenkels reflektiert ein Schwimmer das Licht des Lasertriangulators (Ltri). Da in der Messstrecke bei bewegter Luft stets Unterdruck



Bild 5. Manometer nach Betz mit Lasertriangulator. Kleines Bild: Schwimmer mit Laserstrahl.

herrscht, senkt sich der Pegel im Messrohr. Diese Absenkung misst der Ltri. Bild 5 zeigt den Aufbau, der über zwei Ausgleichsgefäße verfügt. Verbunden ist das Messrohr dort mit dem Ausgleichsgefäß gleichen Durchmessers (rote Marke). Bild 6 zeigt das originale Manometer nach Betz mit optischer Projektion der Anzeige und seinen Konstrukteur Betz.

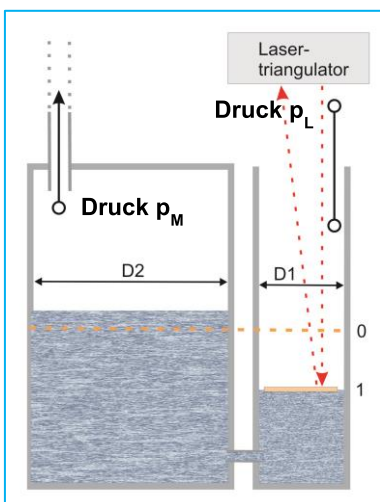


Bild 4. Manometer mit ungleichen Schenkeln.

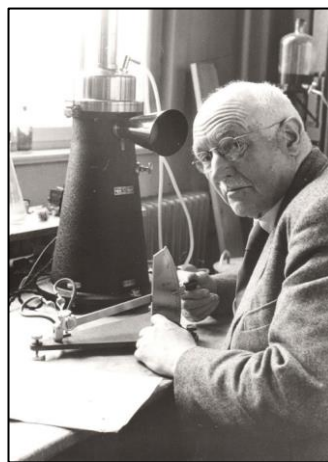
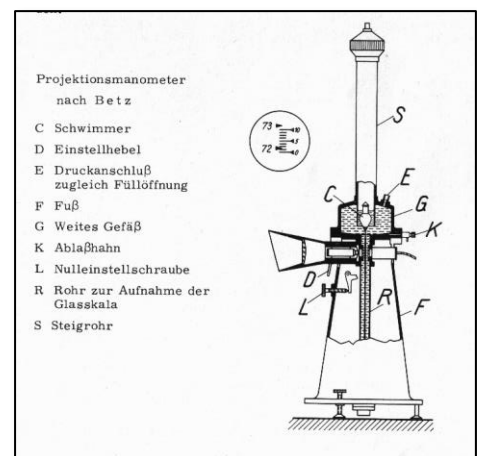


Bild 6. Albert Betz (1885 – 1968) mit Manometer. Direktor der vormaligen Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen, heutiges Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Quelle: Archiv des DLR.



5. THEORETISCHES MODELL DER MESSUNG DER GESCHWINDIGKEIT IM EIFFELKANAL

Die nachfolgende Darstellung des theoretischen Modells verfolgt den Zweck, den vollständigen Formelsatz zu notieren, der für die Geschwindigkeit V selbst und die Fehlergrößen erforderlich ist. Die Geschwindigkeit $V(X_i)$ in der Messstrecke wird als Funktion von fünf veränderlichen Variablen X_i angesehen:

$$(1) \quad V(U_{Ltri0}, U_{Ltri1}, t_L, p_L, r_H)$$

Die Variablen sind

- Lasertriangulator mit
- U_{Ltri0} [V]: Messwert bei Ruhe,
- U_{Ltri1} [V]: Messwert bei Bewegung und physikalische Eigenschaften der Luft mit
- t_L [°C] Temperatur im Labor,
- p_L [Pa] Luftdruck im Labor und
- r_H {0 ... 1} rel. Luftfeuchte.

Für diese Variablen wird eine Fehlerrechnung durchgeführt:

$$(2) \quad \delta V = \sqrt{\sum_1^5 \left(\delta X_i \cdot \frac{\partial V}{\partial X_i} \right)^2}$$

Die Darstellung ist nur knapp erläutert und verwendet Gleichungen, die zu physikalischen Grundkenntnissen gehören ohne Angabe von Referenzen. Ziel dieser Darstellung ist die Möglichkeit, die Fehlerrechnung in algebraischer Form durchzuführen. Dadurch ist die Beurteilung des Einflusses der verschiedenen Variablen auf rein theoretischer Grundlage möglich.

Anfang der Beschreibung ist die Druckdifferenz zwischen dem Druck p_L im Laborraum und dem Druck p_M in der Messstrecke:

$$(3) \quad p_{dif} = p_L - p_M$$

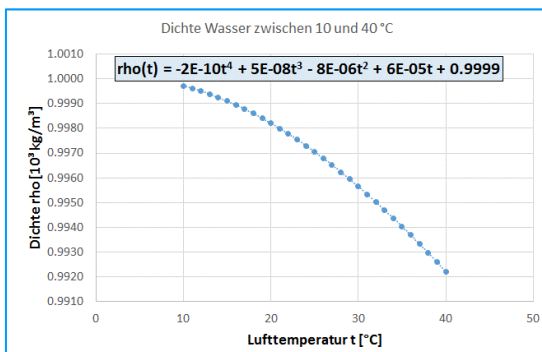


Bild 7. Interpolation der Dichte von Wasser.

Die Bernoulli-Gleichung liefert die Geschwindigkeit V aus der Druckdifferenz und der Dichte der Luft:

$$(4) \quad V = \sqrt{2 \cdot p_{dif} / \rho_{Luft}}$$

Gemessen wird die Druckdifferenz über die Pegeldifferenz H_{dif} der Flüssigkeitssäule im Messrohr und im Ausgleichsrohr. Gemessen wird nur die Pegeldifferenz im Messrohr, da sich die Pegeländerung im Ausgleichsrohr rechnerisch aus dem Verhältnis der Querschnittsflächen der beiden Schenkel ergibt. Die Masse hängt ab von der Differenz der Dichten der Sperrflüssigkeit und der umgebenden Luft. Die Sperrflüssigkeit ist destilliertes Wasser:

$$(5) \quad p_{dif} = H_{dif} \cdot (\rho_{Wasser} - \rho_{Luft}) \cdot g$$

g ist die Schwerkraftbeschleunigung am Ort des Labors. Die Pegeldifferenz in Metern folgt aus den gemessenen elektrischen Spannungen U_{Ltri} des Ltri im Ruhezustand 0 und bei Durchströmung 1:

$$(6) \quad H_{dif} = (U_{Ltri1} - U_{Ltri0}) \cdot S_{Ltri} \cdot (1 + f_M)$$

mit $S_{Ltri} = 0.05 \text{ m/V}$ und $f_M = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$

Der Eichfaktor S_{Ltri} für den Ltri ist geräteabhängig. Die Durchmesser im verwendeten Manometer haben die Werte $D_1 = 0.044 \text{ m}$ und $D_2 = 0.094 \text{ m}$. Daraus ergibt sich $f_M = 0.2191$. Die Dichte der Luft folgt aus der Zustandsgleichung für das ideale Gas:

$$(7) \quad \rho_{Luft} = p_L / (R_f \cdot T)$$

Darin ist p_L der schon erwähnte Luftdruck im Laborraum, R_f die spezifische Gaskonstante für feuchte Luft und $T = T_0 + t_L$ die absolute Temperatur im Laborraum in Kelvin mit der Nullpunktemperatur $T_0 = 273.15 \text{ K}$. Für R_f gilt:

$$(8) \quad R_f = \frac{R_l}{1 - r_H \cdot p_d / [p_L \cdot (1 - R_l/R_d)]}$$

Darin ist

- $R_l = 287.05 \text{ J/(kg K)}$ spez. Gaskonstante trockene Luft,
- $R_d = 461 \text{ J/(kg K)}$ spez. Gaskonstante Wasserdampf und
- $p_D(t)$ Sättigungsdampfdruck Wasserdampf.

Letzterer ist eine Funktion der Temperatur t . Zum Sättigungsdampfdruck von Wasserdampf gibt es eine umfangreiche Literatur. Die hier verwendete Formel ist [7] entnommen:

$$(9) \quad p_D(t) = c_{1,pD} \cdot e^{c_{2,pD} \cdot t / c_{3,pD}}$$

Darin ist $c_{1,pD} = 611.213 \text{ Pa}$, $c_{2,pD} = 17.043$ (ohne Einheit) und $c_{3,pD} = 241.2 \text{ K}$. Auch die Sperrflüssigkeit

destilliertes Wasser ist abhängig von der Temperatur. Für die Abhängigkeit des Wassers ist anhand tabellarischer Werte [8] eine Näherungsformel abgeleitet worden. Dazu wurden die Werte zwischen 0 °C und 40 °C in eine Tabelle von Microsoft Excel eingetragen und als Polynom 4. Ordnung interpoliert (Bild 7). Für Rechnungen, die dem Vergleich dienen, empfiehlt sich für den Labordruck die Verwendung des Normaldrucks $p = p_0 = 101325$ Pa. Schließlich muss die Schwerebeschleunigung für den Ort der Messungen angegeben werden. Dazu ist die Formel aus [9] verwendet worden. Bei der Quelle handelt es sich um eine Publikation der PTB. Die Fallbeschleunigung $g(\varphi, h)$ wird dort durch die mittlere geographische Breite φ als Vielfaches von 1° und die mittlere Höhe h über dem Meeresspiegel als Vielfaches von 100 m angegeben:

$$(10) \quad g(\varphi, h) = 9.780318 (1 + 0.0053024 \sin^2 \varphi - 0.0000058 \sin^2 2 \varphi) - 0.000003085 \cdot h \text{ ms}^{-2}$$

Zu bilden sind nun die partiellen Ableitungen der Funktion $V(U_{Ltri0}, U_{Ltri1}, t_L, p_L, r_H)$ nach diesen fünf Variablen. Diese Arbeit ist mit dem algebraischen Rechenprogramm REDUCE [10] durchgeführt. Die Darstellung der Formeln würde allerdings den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Anstelle von REDUCE können auch andere algebraische Programme wie *Mathematica* oder *Maple* dienen. Mit den Daten einer Messung sei das Ergebnis der Rechnung exemplarisch notiert, wie es als Einzelwert erscheint:

| | |
|----------------------|--------------------|
| comment Messwerte; | comment Fehler; |
| m_ULtri0 := 0.33788; | e_ULtri0 := 0.005; |
| m_ULtri1 := 0.63570; | e_ULtri1 := 0.005; |
| m_tL := 24.1; | e_tL := 0.5; |
| m_pL := 101500; | e_pL := 200; |
| m_rH := 0.59; | e_rH := 0.05; |

Für die partiellen Ableitungen ergeben sich folgende Werte zu diesen Zahlen:

$$\frac{\partial V}{\partial X_1} = 29.09, \quad \frac{\partial V}{\partial X_2} = -29.09, \quad \frac{\partial V}{\partial X_3} = 0.0305,$$

$$\frac{\partial V}{\partial X_4} = 8.6 \cdot 10^{-5}, \quad \frac{\partial V}{\partial X_5} = 0.0973$$

```
out "D:\REDUCE_x32\User\Tmk2_VEL.out";
-----
Fehler U_Ltri: 0.005 V
Fehler t_Labor: 0.5 deg
Fehler p_Labor: 200 Pa
Fehler rH: 0.05 von 1
Geschwindigkeit V = 17.3292 m/s +/- 0.207057 m/s
-----
```

Bild 8. Messdaten und Fehler in REDUCE.

Die Fehlerangaben sind großzügig bemessen und lassen sich bei sorgfältiger Bestimmung auch reduzieren. Sinnvollerweise ist hier $V(X_i) = 17.3 \pm 0.2$ m/s. In der grafischen Darstellung zeigt sich, dass die Auswirkung der Fehler (in rot) auf die Genauigkeit sehr

unterschiedlich ist. Die folgende Grafik verwendet Normaldruck und 20 °C für die Labortemperatur.

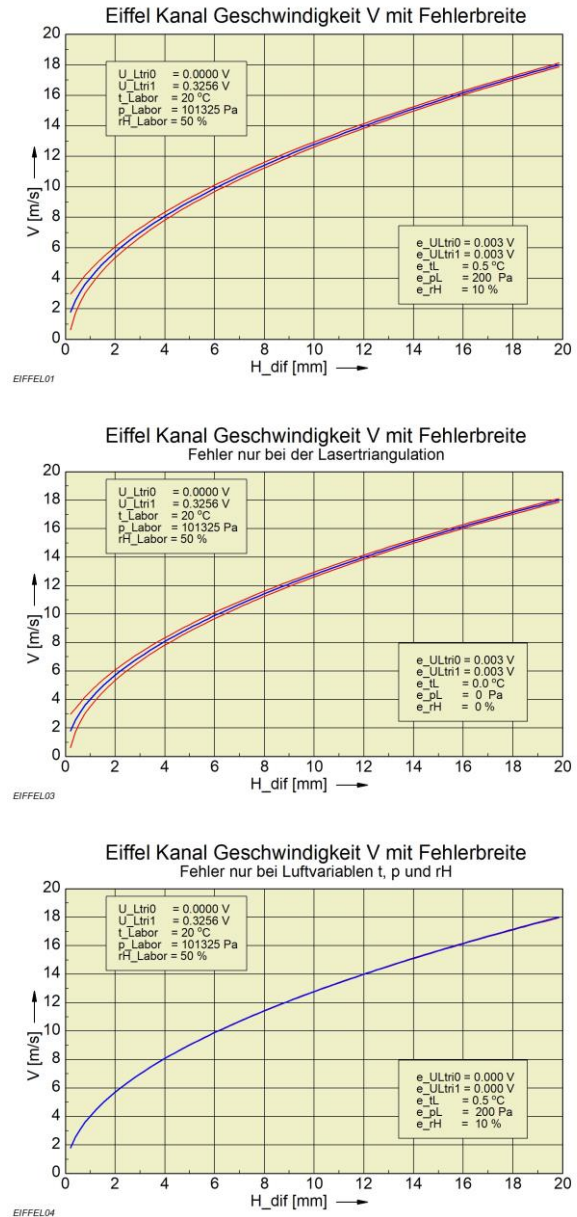


Bild 9. V und Fehlerbreite über H_{dif} .

Der größte Fehler entsteht durch die Ungenauigkeit bei der Messung des Pegels der Fluidsäule. Je kleiner die Geschwindigkeit ist, desto mehr wirkt sich der Messfehler aus. Der Fehler von 3 mV entspricht einer Höhendifferenz von 0.15 mm. Das ist messtechnisch zwar noch gut zu erfassen, aber die Adhäsionskraft zwischen dem Fluid und der Gefäßwand führt zu irregulären Fehlern im Pegelstand.

- Weitere Verbesserungen müssen sich deshalb auf die Materialeigenschaften des Gefäßes und der Flüssigkeit konzentrieren.

6. BESCHREIBUNG DES KANALS UND DER MESSEINRICHTUNGEN

Im Hinblick auf die nachfolgenden CFD-Rechnungen sollen in Ergänzung zu Bild 1 auch Angaben zur Geometrie gemacht werden. In Bild 1 sieht man den Antrieb links, der zu Minderung der Rückwirkung des Antriebsrotors auf die Strömung zwischen Expansionsstrecke und Antrieb einen weiteren Gleichrichter eingebaut hat. Ein solcher Gleichrichter befindet sich auch ganz rechts am Eintrittsportal. Der Gleichrichter besteht aus hexagonalen Waben (Aluminium und pulverbeschichtet) von ca. 12 mm Durchmesser und einer Tiefe von 50 mm. Mit Tiefe werden Maße in Stromrichtung bezeichnet. Auf den Gleichrichter folgt im Abstand von 0.13 m ein Strömungssieb. Das Material ist ein Gitter aus Kunststoffäden mit quadratischen Maschen von 2 mm Kantenlänge. Alle tragenden Rahmenteile bestehen aus Konstruktionselementen der Firma *item* mit einem Querschnitt von 20 mm x 20 mm. Das Material der Kanalwände besteht aus 3 mm starkem Makrolon.

Eintrittsportal und Austrittsportal haben einen Innenquerschnitt von 0.4 m x 0.4 m und sind ebenso wie die Messstrecke alle 0.44 m tief. Die Kontraktion des Querschnitts erfolgt auf 0.25 m x 0.16 m. Das entspricht einem Verhältnis von 4:1. Die Expansion des Querschnitts zum Antrieb hin ist spiegelbildlich zur Kontraktionsstrecke.

Die Kontur der beiden Kontraktionssegmente ist aus kubischen Polynomen gebildet. Die Kanten sind Raumkurven in der Darstellung:

$$(11) \quad \vec{X}(s) = \begin{bmatrix} s \\ f_2(s) \\ f_3(s) \end{bmatrix} \text{ mit } f_i(t) = \sum_{k=0}^{k=3} a_{i,k} s^k$$

Darin ist s die geometrische Lauflänge in Tiefenrichtung. Die Koeffizienten ergeben sich aus den Bedingungen, dass die Funktionswerte den Koordinaten der Eckpunkte der Segmente entsprechen und die

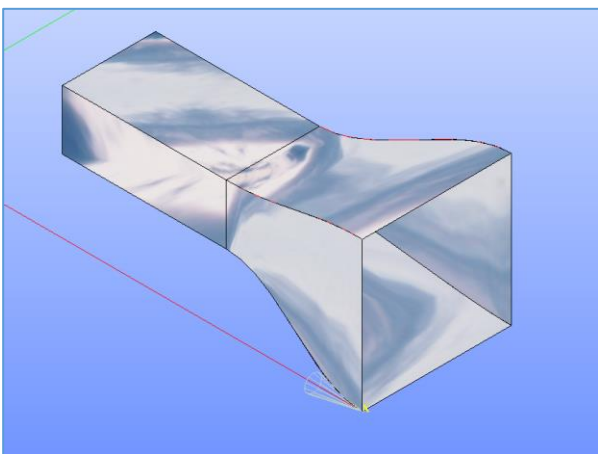


Bild 10. Kontraktions- und Messstrecke. Vorderer mittlerer Eckpunkt: $X(s) = [1.32 \text{ m}, 0, 0]$.

Ableitungen der Funktionen an diesen Ecken verschwinden müssen: $df_i(s)/ds = 0$. Die Kurven laufen also dort jeweils horizontal in Tiefenrichtung ein.

Der Antriebsmotor stammt von *Ziell-Abegg* aus der Serie *FE2owlet-ECblue* mit 420 W Wechselstrom. Eine Steuerspannung $U_{ctrl} = \{0...10 \text{ V}\}$ regelt den Motor. Über eine Regeleinheit *UNIcon* des gleichen Herstellers kann die Windgeschwindigkeit zusammen mit einem Anemometer auf einem einstellbaren Sollwert gehalten werden. Verwendet wird hierfür das Heißfilmanemometer *EE75* der Firma *E+E Elektronik*. Das Gerät hat einen abgesetzten Fühler, der die Windgeschwindigkeit und Temperatur auf $\{0...10 \text{ V}\}$ abbildet. Für die hier dargestellten Messungen kann der Fühler ausgebaut werden und ist dabei auch selbst Gegenstand der Untersuchungen.

Die Datenerfassung erfolgt mit dem Gerät *NI USB-6212* von *National Instruments* (NI) und den Werkzeugen *LabView* und *DAQExpress* von NI für die Auswertung und Aufzeichnung der Daten.

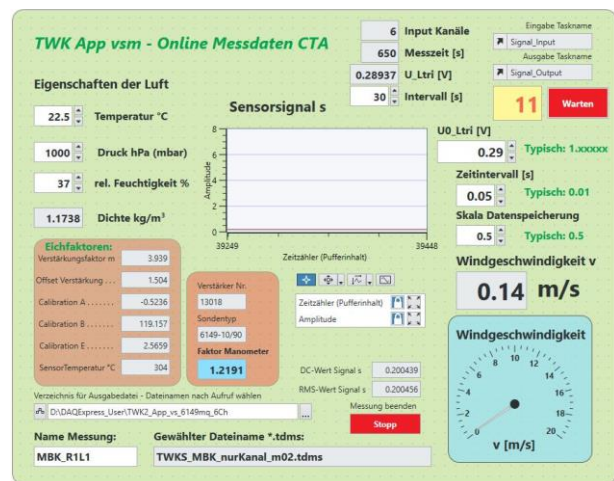


Bild 11. Auswerte-Applikation unter Verwendung von LabView und DAQExpress

Das voranstehende Bild zeigt die für die Versuchsserie entwickelte Applikation mit LabView. Neben der Online-Berechnung der Luftdichte mit ihren recht komplizierten Formeln muss für einige der verwendeten Sensoren auch das Ergebnis des zugehörigen Messverstärkers online in Windgeschwindigkeit umgerechnet werden. Dabei werden große Zahlen mit kleinen multipliziert und es zeigt sich, dass das Ergebnis der Umrechnung mehr „Rauschen“ enthält als die gleichzeitig eingehenden Signale.

Den **Fluidpegel** misst der Lasertriangulator des Typs *S67-MH-5-Y13V* der Firma *Datalogic*. Das Gerät erfasst die Entfernung in einem Bereich 0.1 m bis 0.6 m hinter der Austrittsebene und bildet diesen Bereich von 0.5 m Messtiefe auf $\{0...10 \text{ V}\}$ ab. Die Auflösung nimmt mit zunehmender Entfernung zu von $\pm 0.015 \text{ mm}$ auf $\pm 0.67 \text{ mm}$ und die Abweichung der Linearität von $\pm 0.05 \text{ mm}$ auf $\pm 2.0 \text{ mm}$. Im verwendeten Nahbereich bis 100 mm kann

man von der unteren Schwelle der Genauigkeiten ausgehen. Es zeigt sich daran, dass der angenommene Fehler für die Spannung des Ltri von 3 mV bzw. 0.15 mm im unteren Messbereich gerechtfertigt ist.

Die drei physikalischen Größen Temperatur, Druck und Feuchte der Luft werden mit zwei verschiedenen Messgeräten erfasst.

Der **Druck** wird gemessen mit dem Gerät *GDH200* der Firma *Greisinger*. Das Gerät hat keinen Datenausgang und gibt die Werte mit ± 1 hPa aus. Der angenommene Fehler im Druck von ± 2 hPa berücksichtigt diese Genauigkeit ausreichend.

Temperatur und Feuchte kommen von einem Kombinationsgerät *Hygro-Thermogeber compact* der Firma *ThiesClima*. Die Ausführung 1.1005.54.161 bildet den Bereich $-30 \dots 70$ °C und $0 \dots 1$ rH auf $\{0 \dots 10$ V} ab. Die Genauigkeit der Temperatur beträgt ± 0.2 K, der Feuchte ± 2 %.

7. ERGEBNISSE UND VERGLEICHENDE MESSUNGEN

Die Ergebnisse bei den Versuchen werden abgespeichert in dem von NI entwickelten Format TDMS. Die Daten können mit der Software DAQExpress wieder gelesen und im Prinzip auch über LabView weiterverarbeitet werden. Für das Wiedereinlesen zur Kontrolle und Bewertung eignet sich die Software *GSVmulti* der Firma *ME-Meßsysteme* allerdings bedeutend besser [11]. Die kostenlose Software ist von der Firma für ihre eigenen Messverstärker für Kraftsensoren und Dehnungssensoren entwickelt

worden und beruht auf LabView und dem Datenformat TDMS. Somit ist sie hierzu vollständig kompatibel. Mit diesem Programm sind exemplarisch die Rohdaten einer Messung als Spannungswerte in Volt dargestellt (Bild 11), die vom Ltri stammen.

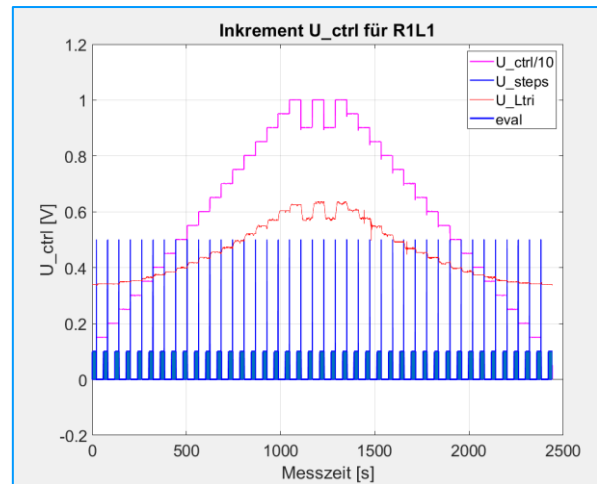


Bild 12. Verarbeitung der Rohdaten des Ltri.

Drei Cursorbalken markieren die Grundlinie (grün), den maximalen Pegelstand und einen Zwischenwert. Der Zwischenwert ist mehrfach angefahren worden, um die Wiederholbarkeit der Signale zu testen. Wie schon erwähnt führen die Adhäsionskräfte manchmal zum „Kleben“ des Fluids. Dies sieht man deutlich bei den Vergleichen des wiederholten Anfahrens von Maximalwert (gelb) und Zwischenwert (rot). Die



Quelle: TWKS_MBK_S6149_m11_170621_Test01_R1L1

Bild 11. Rohdaten einer Messung mit dem Lasertriangulator.

Verarbeitung der Rohdaten erfolgt im weit verbreiteten Programm *Matlab*. Für das Einlesen von TDMS-Dateien in Matlab gibt es nach den Erfahrungen des Verfassers nur einen einzigen wirklich funktionsfähigen Satz von Programmen [12]. Ohne auf die Details eingehen zu wollen, zeigt Bild 12 die zugehörige Auswertung. Man erkennt die wiederholte Stufung der Steuerspannung U_{ctrl} und das Signal U_{Ltri} .

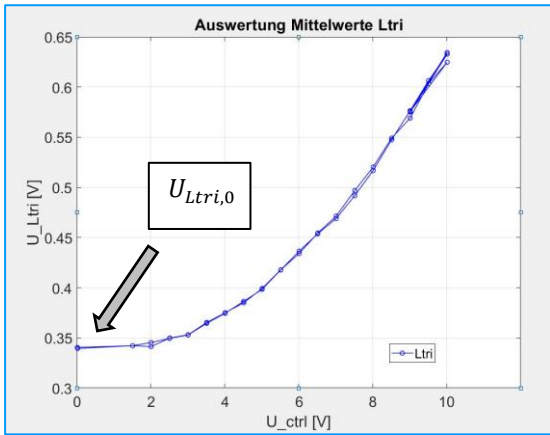


Bild 13. Verarbeitete Rohdaten des Ltri.

Die Sprünge in der Steuerspannung markieren die Intervalle der Aufzeichnung, über die jeweils gemittelt wird. Ausgewertet wird dabei nur der letzte Teil eines jeden Intervalls, nachdem der Pegel sich neu eingestellt hat. Der ausgewertete Teil ist durch die breiten blauen Balken gekennzeichnet. Das verarbeitete Signal in Bild 13 geht anschließend ein in die Berechnung der zugehörigen Geschwindigkeit, wie sie nachfolgend für Vergleiche mit den Werten von verschiedenen Sensoren herangezogen wird.

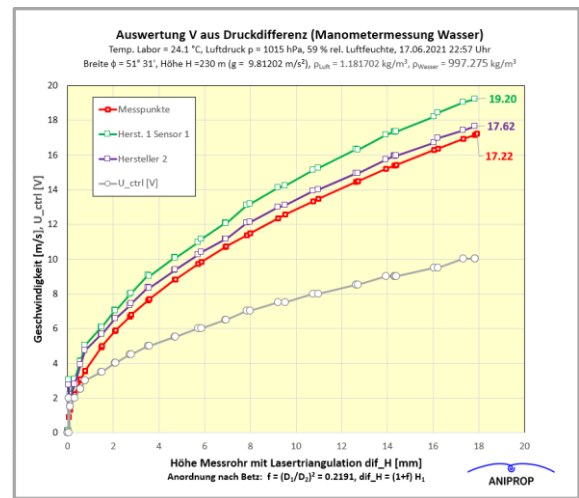
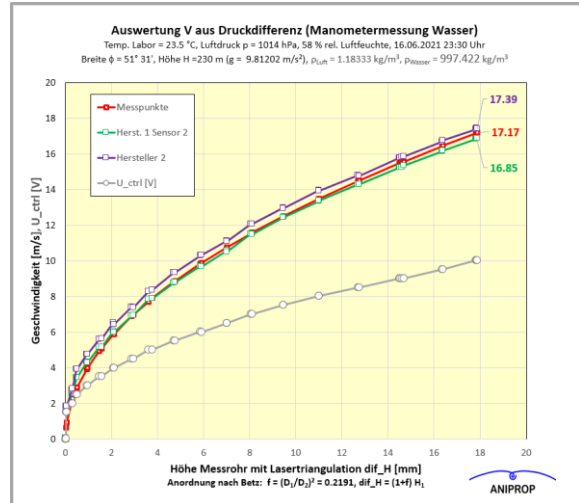


Bild 14. Vergleichende Messungen.

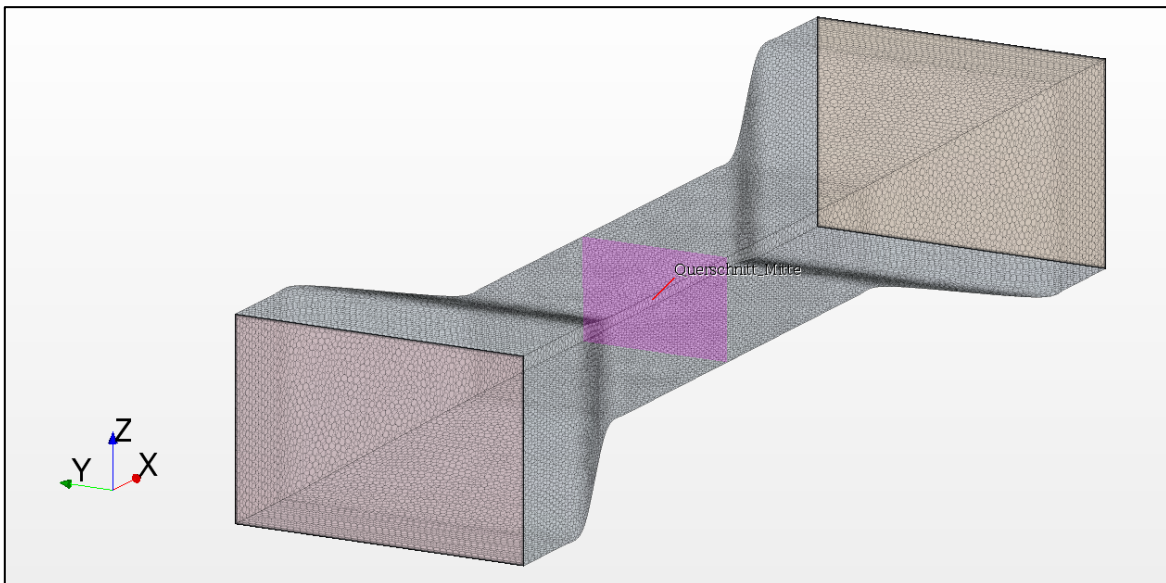


Bild 15. Rechennetz (Volumennetz) des Eiffelkanals mit in Tiefe verdoppelter Messstrecke.

Die beiden Grafiken in Bild 14 zeigen zwei Messungen an zwei aufeinander folgenden Tagen. Die rote Kurve stellt das Ergebnis der Manometermessung dar. Die grüne und die violette Kurve sind Daten von zwei verschiedenen Herstellern. Die graue Kurve ordnet der Pegeldifferenz die jeweilige Steuerspannung zu. Die Messung mit Sensor 1 des Herstellers 1 zeigt offenkundig einen Fehler auf.

8. STRÖMUNGSEIGENSCHAFTEN DES EIFFELKANALS MIT CFD BERECHNUNG

Neben der Beschreibung der Versuche stellen sich insbesondere die Fragen nach den Eigenschaften der Strömung in der Messstrecke. Da diese für den Zweck der Druckmessung geschlossen ist, lassen sich zwar Querschnittsmessungen längs ausgewählter Achsen durchführen, Längsmessungen aber nur schwer realisieren. Ob Messungen mit LDA durch optisch durchlässige Wände ohne Fehler möglich sind, wurde bislang nicht geprüft. Antworten zur Strömung gibt die numerische Analyse mithilfe einer CFD-Rechnung. Als CFD-Programm wird STAR-CCM+ verwendet.

Bild 15 zeigt das Volumennetz der Anordnung, die untersucht worden ist. Die Geometrie ist ähnlich wie die Geometrie des gebauten Kanals (Bild 10), die Messstrecke ist aber in der Tiefe verdoppelt worden, um auch Untersuchungen an der Entwicklung der Wandgrenzschicht durchführen zu können. Zu dem hervorgehobenen Querschnitt gehören die nachfolgenden Querschnittsdaten in Bild 17.

8.1. Randbedingungen und Numerik

Die Randbedingungen (BCs) für den Eiffelkanal sind:

- Außendruck am Eintrittsportal der Strömung,
- definierte Geschwindigkeit am Austrittsportal.

Der Antrieb zieht die Luft durch den Kanal. Eine Volumenstrommessung am Austritt der Strömung wäre erforderlich, um eine unabhängige Überprüfung der Geschwindigkeit in der Messstrecke zu ermöglichen. Tatsächlich lässt sich die Austrittsbedingung nicht ohne weiteres einrichten, weil die BCs gewöhnlich genau umgekehrt formuliert werden, also Geschwindigkeit am Eintrittsportal und Druck am Austrittsportal. Gleichwohl liegen erste Ergebnisse vor. Für die Strömung in der Messstrecke selbst darf man von der Richtigkeit der Lösung ausgehen.

Das Rechenverfahren ist ein implizit instationärer Algorithmus als *segregated flow model*. Dabei werden die vier Strömungsgleichungen ungekoppelt gelöst. Die Verknüpfung erfolgt über ein Prediktor-Korrektor-Verfahren. Für die Turbulenz ist das $k-\epsilon$ Modell gewählt.

8.2. Ergebnisse

Bild 16 zeigt V_x für die beiden BCs. Gespiegelt sind die Konturlinien in der Messstrecke sehr ähnlich.

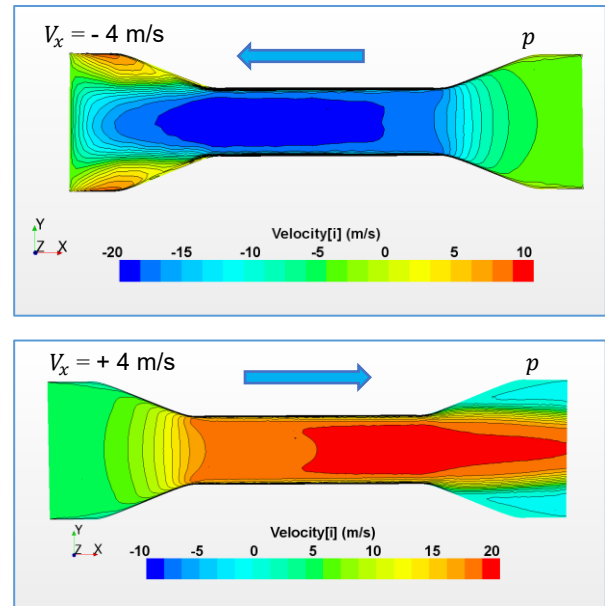


Bild 16. Längsschnitt mit V_x zu zwei BCs.

Die Näherung der Grenzschichtgleichungen bei Ludwig Prandtl geht davon aus, dass der Druck durch die Grenzschicht hindurch konstant bleibt. Diese Annahme rechtfertigen die beiden folgenden Bilder:

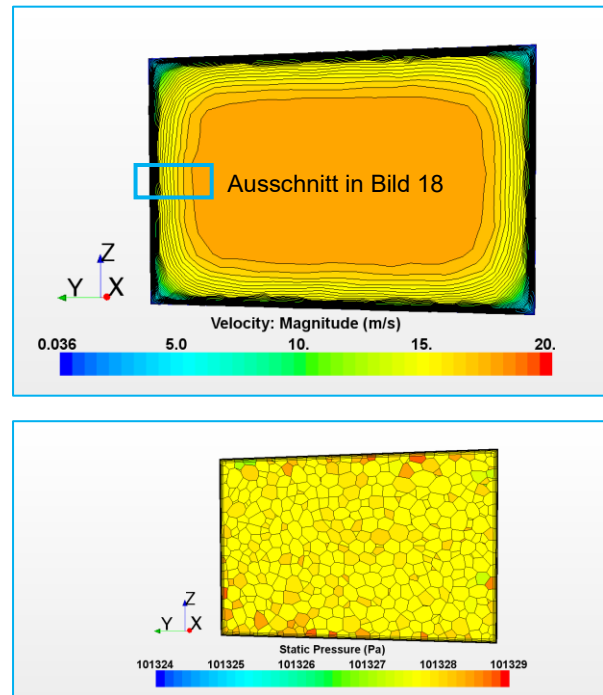


Bild 17. Geschwindigkeit und Druck in dem Querschnitt nach Bild 15.

In der Darstellung des Drucks sind anstelle der Konturlinien die Werte in den einzelnen Netzzellen beibehalten worden. Die Auflösung der Grenzschicht mit 20 Prismenschichten ist in beiden Bildern sichtbar. Einen Ausschnitt mit der Grenzschicht zeigt

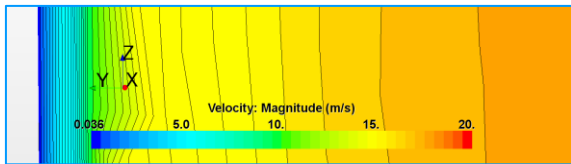


Bild 18. Randbereich der Strömung.

Bild 18. Geschwindigkeit und Druckverteilung in Bild 17 gehören zu der unteren Lösung in Bild 16. Die Breite des Randabfalles hat überrascht und passt auch nicht ganz zu den Messungen im Querschnitt des Kanals. Hier steht noch eine Verifizierung der Ergebnisse an.

9. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

- Der Eiffelkanal mit Mikromanometer liefert einen definierten Massenstrom durch die Messstrecke. Im leeren Kanal ohne Versperrung sind Geschwindigkeitsmessungen besonders gut möglich.
- Wichtig sind eine genaue Fertigung und eine geprüfte Symmetrie in der Zuströmung.
- Das Experiment beruht physikalisch auf elementaren Grundlagen. Schon rein mechanisch ist eine erste Vorhersage der gesuchten Geschwindigkeit möglich.
- Das theoretische Modell liefert eine vollständige Theorie und ermöglicht eine komplette Fehlerabschätzung mit Variation der relevanten Genauigkeiten.
- Für eine Online-Auswertung ist die Stellenbreite zu prüfen. Es werden große Zahlen mit kleinen multipliziert, was ein aktuelles Problem darstellt.
- Die Versuchseinrichtung gestattet eine vergleichsweise leichte Überprüfung von Sensoren und sonstigen Messtechniken.

Für die Zukunft könnte das Verhältnis der Durchmesser von Messrohr und Ausgleichsrohr noch kleiner sein. Bei Betz ist dies $(D_1/D_2)^2 = 0.11$, in der aktuellen Versuchseinrichtung ist $(D_1/D_2)^2 = 0.22$. Die in Angriff genommene Nachrechnung der Strömung mit einem CFD-Verfahren eröffnet neue Möglichkeiten auch bei größeren Kanälen dieser Bauart.

Ein in nächster Zukunft geplantes Vorhaben ist die Bestimmung des Volumenstroms am Austrittsportal des Kanals. ANIPROP GbR verfügt über eine automatisch steuerbare 2D Traversiereinrichtung mit einem Querschnitt von 0.6 m x 0.6 m. Damit kann die mittlere Austrittsgeschwindigkeit als Randbedingung für eine CFD-Rechnung vorgegeben werden.

DANKSAGUNGEN

Die Unterstützung durch Prof. Dr. Volker Carstens, vormals längerjähriger Kollege des Verfassers beim DLR in Göttingen, war wesentlich. Ohne ihn wäre die numerische Untersuchung mit einem CFD-Verfahren nicht in Angriff genommen worden.

Dr. Uwe Kaiser von *SVMtec* sei für die sorgfältige Untersuchung und Nacheichung der verschiedenen Sensoren gedankt sowie für den intensiven Gedankenaustausch zur Güte von Eichverfahren.

Dr. Dietmar Pachinger von *E+E* hat neben seinen eigenen Messungen wertvolle Informationen und Literatur zu Eichverfahren zur Verfügung gestellt.

Der Miteigentümerin von ANIPROP GbR Johanna Send sei sehr gedankt für die beständige Unterstützung bei diesem Projekt.

LITERATUR UND QUELLEN

- [1] Handbuch der Experimentalphysik, IV Hydro- und Aerodynamik. Teil 1, Strömungslehre und allgemeine Versuchstechnik. Hrsg. L. Schiller, Akademische Verlagsgesellschaft m.b.H. Leipzig 1931. Kapitel: Peters H, *Druckmessung*, Betz A, *Mikromanometer*.
- [2] *Strömungsmessgeräte und Hilfseinrichtungen der Aerodynamischen Versuchsanstalt und des Max-Planck-Instituts für Strömungsforschung zu Göttingen*, Hrsg. Und Druck Dokumentationsstelle der Max-Planck-Gesellschaft (ohne Jahreszahl). Quelle: Archiv des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Göttingen.
- [3] Müller H, Pape N, Frau Kampe J. *Die Bedeutung von Laser-Doppler-Anemometern für Metrologie-Institute*. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 9. – 11. September 2014, Karlsruhe
- [4] Müller H. *LDA-based intercomparison of anemometers, Final Report 2012*, EURAMET Project No. 827. Published by: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 38116 Braunschweig, Germany.
- [5] Mrs. Chunovkina A, Cox M. *A Model-based Approach to Key Comparison Data Evaluation*, XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium, June 22-27, 2003, Dubrovnik, Croatia
- [6] Lerch H. *Intercomparison of Anemometers Part 1: Results*, EUROMET Project No. 388 Final Report Swiss Federal Office of Metrology, 1999.
- [7] Quelle: <https://www.chemie.de/lexikon/Luftdichte.html>
- [8] Quelle: <https://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/w/wasser-dichtetabelle.php>
- [9] Quelle: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_1/1.1_masse/1.15_gravzonen.pdf
- [10] Quelle: <https://reduce-algebra.sourceforge.io/>
- [11] Quelle: <https://www.me-systeme.de/de/software/gsvmulti>
- [12] Quelle: Hokanson J, *TDMS Reader* https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30023-tdms-reader?s_tid=prof_contriblnk

■ ■ ■ ■ ■