



**ANIPROP**

Felix Scharstein und Dr. Wolfgang Send  
GbR

# **Kleiner Windkanal**

## **ANIPROP KWK 2**

Anleitung zum Aufbau und Betrieb des Kanals  
Hinweise zu Experimenten

Version 04/2008

## Inhaltsverzeichnis

<b>A. Baugruppen.....</b>	<b>3</b>
1. Übersicht .....	3
2. Antriebseinheit .....	3
3. Kontraktionsstrecke .....	4
4. Messtisch .....	4
5. Support .....	5
5. Experimentierschiene .....	5
<b>B. Technische Daten.....</b>	<b>6</b>
1. Zusammenfassung der technischen Daten .....	6
2. Turbulenzgrad .....	6
3. Geschwindigkeitsprofil der Strömung.....	7
4. Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Spannungsversorgung.....	7
<b>C. Aufbau und Betrieb des Kanals .....</b>	<b>8</b>
1. Liste aller Bauteile mit Bezeichnungen.....	8
2. Übersicht über die Reihenfolge beim Aufbau .....	9
3. Zusammenfügen von Antriebseinheit und Kontraktionsstrecke .....	10
4. Anbau des Messtisches .....	10
5. Experimentierschiene mit Anbauten .....	11
6. Support und Aufsetzen des Supports .....	11
<b>D. Mitgelieferte Experimente .....</b>	<b>13</b>
1. Experiment Visualisierung der Randwirbel.....	13
2. Experiment Geschwindigkeitssensor .....	14
3. Messungen mit dem Geschwindigkeitssensor .....	16
4. Messungen mit der Waage.....	18
5. Beispiele für Messungen mit der Waage .....	19

## A. Baugruppen

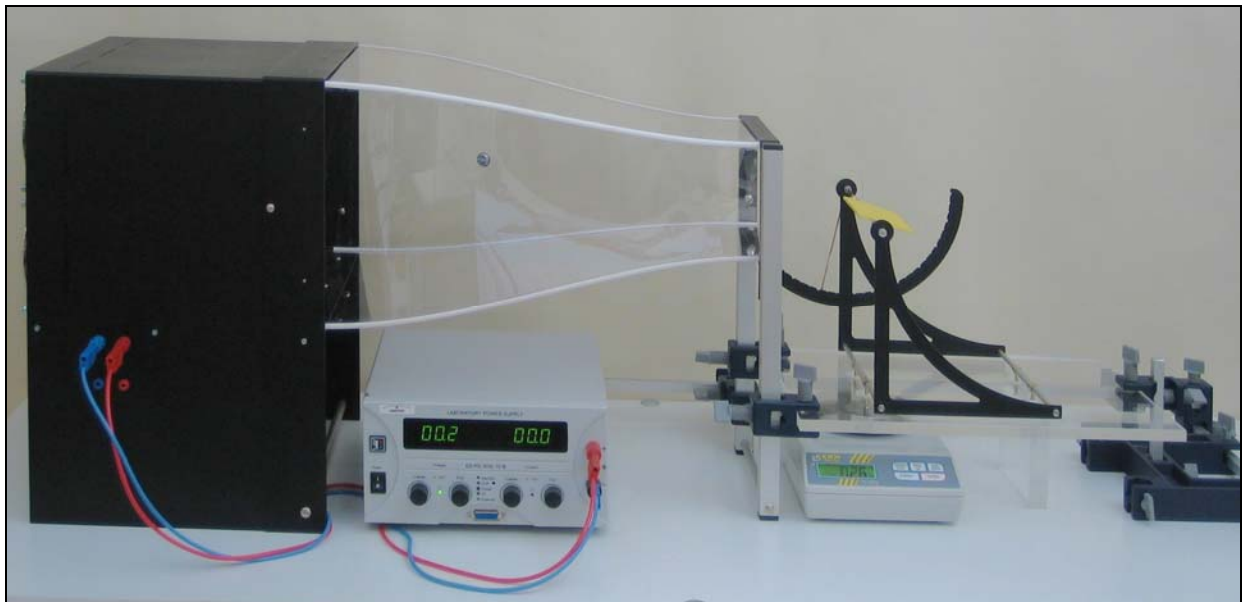
### 1. Übersicht

Der Windkanal hat in aufgebautem Zustand insgesamt die **Abmessungen** 0.5 m in der Höhe, 0.5 m Breite und eine Länge von 1.4 m. Damit passt er auf jeden Experimentiertisch. Als Länge wird die Abmessung in Stromrichtung bezeichnet. Als **Strahlachse** wird die gedachte Linie bezeichnet, die die Flächenmittelpunkte von Eintrittsquerschnitt und Austrittsquerschnitt des Luftstroms verbindet. Der KWK 2 besteht aus folgenden **Baugruppen**:

- Antriebseinheit mit Netzteil
- Kontraktionsstrecke
- Messtisch mit Waage(n)
- Support
- Experimentierschiene

### 2. Antriebseinheit

Die **Antriebseinheit** enthält sechs leistungsstarke Lüfter, welche die Luft ansaugen und beschleunigen. Die Lüfter haben einen Querschnitt von jeweils  $0.12 \times 0.12 \text{ m}^2$ . Dadurch ergibt sich ein Querschnitt von  $0.24 \times 0.36 \text{ m}^2$  für den Luftstrom. Die Lüfter sind elektronisch geregelt und laufen erst bei einer Mindestspannung an. Das Netzteil versorgt die Lüfter mit maximal 30 V Gleichspannung. Der Leistungsbedarf beträgt dann 180 W bei einem Strom



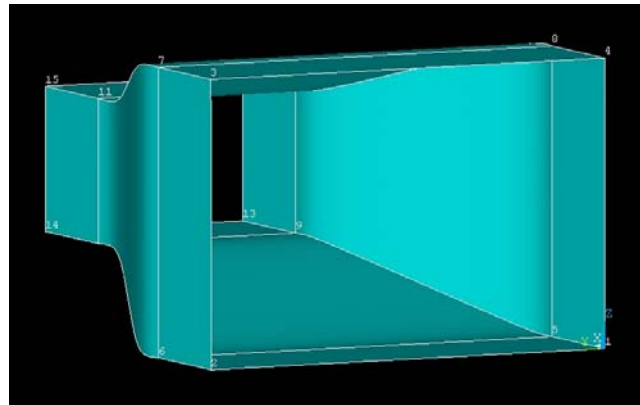
Kleiner Windkanal KWK2 – Gesamtansicht

Von links nach rechts: Antriebseinheit mit Wabengleichrichter und Sieb im Innern – Kontraktionsstrecke 4:1, darunter die Spannungsversorgung des Antriebs – Messtisch mit Support, darunter die Waage. Die runde Metallabdeckung in der Mitte der Kontraktionsstrecke verschließt die Öffnung für das Dampfrohr zur Sichtbarmachung der Randwirbel.

von 6 A. Innerhalb der Antriebseinheit befindet sich ein Wabengleichrichter, in dem die Querschwingungen der Strömung gemildert werden. Auf den Wabengleichrichter folgt ein feines Sieb zur weiteren Reduzierung des Turbulenzgrades. Angeschlossen wird die Gleichspannung über zwei mitgelieferte Kabel an die beiden großen Anschlussbuchsen. Die Farbgebung rot steht für den Pluspol, blau für den Minuspol. Die beiden kleineren Buchsen dienen zur Entnahme der veränderlichen Motorspannung für Versuchszwecke.

### 3. Kontraktionsstrecke

Die **Kontraktionsstrecke** hat eine Verjüngung von 4:1. Nominell beschleunigt sich die Luft dadurch auf die vierfache Geschwindigkeit. Der Austrittsquerschnitt beträgt  $0.12 \times 0.18 \text{ m}^2$ . Faktisch beträgt die Austrittsgeschwindigkeit des Luftstrahls zwischen  $5 - 15 \text{ m/s}$ , gemessen  $0.1 \text{ m}$  hinter dem Austrittsquerschnitt und auf der Strahlachse. Die Kontraktionsstrecke wird über den Kasten der Antriebseinheit angehoben und rastet in zwei Halterungen ein. Dadurch ist sie mit der Antriebseinheit im Betrieb fest verbunden.



Kontraktionsstrecke

### 4. Messtisch

Der **Messtisch** ist eine Acrylplatte der Stärke  $12 \text{ mm}$ , die auf der einen Seite mit der Kontraktionsstrecke über zwei Doppelmuffen verbunden ist und auf der stromab liegenden Seite von einer weiteren Doppelmuffe gehalten wird. Letztere Muffe hält an einem vertikalen Stativstab, der in einen H-Fuß eingespannt ist. In aufgebautem Zustand soll sich die Oberkante des Messtisches in  $110 \text{ mm}$  Höhe über dem Experimentiertisch befinden, auf dem ganze Kanal aufgebaut ist.

Der Messtisch enthält vier Durchführungen  $\varnothing 18 \text{ mm}$  im seitlichen Abstand von  $70 \text{ mm}$  und in Stromrichtung von  $180 \text{ mm}$ . Jeweils zwei Bohrungen befinden sich  $100 \text{ mm}$  und  $190 \text{ mm}$  hinter der Austrittsebene des Luftstrahls. Durch diese Bohrungen führen die Halterungen, mit denen der Support auf der unter dem Messtisch befindlichen elektronischen Waage ruht. Der nachfolgend beschriebene Support gestattet die gleichzeitige Messung von zwei Kraftkomponenten, die auf die beiden Lagerachsen wirken. Je nach Messung steht die Waage unter der vorderen oder der hinteren Lagerschale des Supports. Optional kann eine weitere Waage beschafft werden, so dass die Auflagerkräfte von vorderer und hinterer Lagerachse gleichzeitig gemessen werden können.

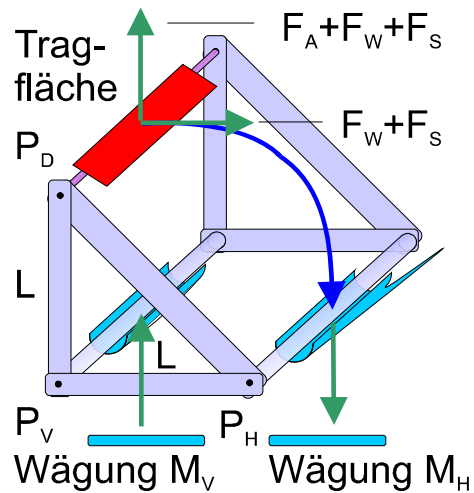
Der Abstand  $L$  der Lagerachsen von  $180 \text{ mm}$  bestimmt die Breite von zwei Waagen. Als **Waagentyp** ist die elektronische Waage 440-35A der Firma Kern & Sohn GmbH<sup>1</sup> ausgesucht worden, auf deren Abmessungen hin der Messtisch ausgelegt worden ist. Die Waage misst bis  $600 \text{ g}$  und mit einer Ablesegenauigkeit von  $0.01 \text{ g}$ . Ein Exemplar dieser Waage wird mitgeliefert. Allerdings können auch andere Waagen vergleichbaren Typs an den Messtisch

<sup>1</sup> <http://www.kern-sohn.com/index.html>

angepasst werden. Wird nur eine Waage verwendet, dann ruht die jeweils andere Lagerachse auf einem Lagerblock.

## 5. Support

Der **Support** steht auf dem zuvor beschriebenen Messtisch. Das Bild zeigt das Messprinzip des Supports, mit dem die Komponenten Auftrieb und Widerstand der Luftkraft auf eine Tragfläche oder auf ein anderes Messobjekt gemessen werden können. Die Konstruktion besteht aus zwei dreieckigen, rechtwinkligen Seitenteilen, die an den Eckpunkten durch Achsen quer zur Stromrichtung miteinander verbunden sind. Der eine der beiden Schenkel verbindet vordere ( $P_V$ ) und hintere Lagerachse ( $P_H$ ), der andere ist der Strömung zugewandt und trägt das zu untersuchende Objekt. Dieses kann um eine zu den Lagerachsen parallele Achse ( $P_D$ ) gedreht werden. Greift eine Kraft an dem zu untersuchenden Objekt an, so wirkt die zur Strahlrichtung parallele Kraftkomponente auf beide Achsen, die zur Strahlrichtung senkrechte Komponente nur auf die vordere Lagerachse. Bei einem Objekt, das nur Widerstand erfährt, wird die vordere Lagerkraft um den gleichen Betrag kleiner, um den die hintere Lagerkraft größer wird.



Messprinzip des Supports

## 5. Experimentierschiene

Die **Experimentierschiene** ist ein Aluminiumvierkant mit  $12 \times 12 \text{ mm}^2$  Querschnitt, der – in Stromrichtung gesehen – auf der linken Seite des Kanals von der Mitte der Kontraktionsstrecke bis zum Ende des Messtisches verläuft. Auf der Schiene können verschiedene experimentelle Einrichtungen wie etwa eine Sonde befestigt werden. Die Schiene ist an zwei Stellen mit dem Kanal verbunden: Über einen Rundstab von  $\varnothing 12 \text{ mm}$  und  $80 \text{ mm}$  Länge wird der Abstand zum Kanal fixiert. Der Rundstab ist mit einer Doppelmuffe am Ständer befestigt, auf dem die Kontraktionsstrecke am Strahlaustritt aufliegt. Eine weitere Doppelmuffe schafft die Verbindung zur Experimentierschiene. Am Ende des Messtisches wird die Experimentierschiene mittels einer Doppelmuffe mit einem quer zur Strömung liegenden Vierkant verbunden, der seinerseits in dem H-Fuß für den Messtisch befestigt ist.

Die Experimentierschiene hat zwei Aufgaben. Erstens dient sie der schon genannten Aufnahme von zusätzlichem Experimentiergerät, zweitens bewirkt sie eine starre Verbindung zwischen Kontraktionsstrecke und dem Messtisch. Schon kleine Verschiebungen zwischen Strahlrichtung und Messtisch haben einen Einfluss auf die Messergebnisse.

Im Lieferumfang enthalten sind zwei vertikale Schienen zur Aufnahme des Dampfrohres und für den Sensor zur Darstellung von relativen Geschwindigkeitsunterschieden. Auch andere Sensoren wie ein Prandtl-Staurohr können dort eingeklemmt werden.

## B. Technische Daten

### 1. Zusammenfassung der technischen Daten

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die technischen Daten:

Geschwindigkeitsbereich	5-15	m/s
Kontraktionsverhältnis	4:1	
Nenngeschwindigkeit	12	m/s
Messquerschnitt B x H	0.18 x 0.12	m <sup>2</sup>
Turbulenzgrad bei 10 m/s	< 0.5	%
Bezugslänge $\ell$	0.06	m
Reynoldszahlbereich für $\ell$	20 - 60 000	
Maximale Antriebsleistung	180	W
Spannungsversorgung	bis 30	V

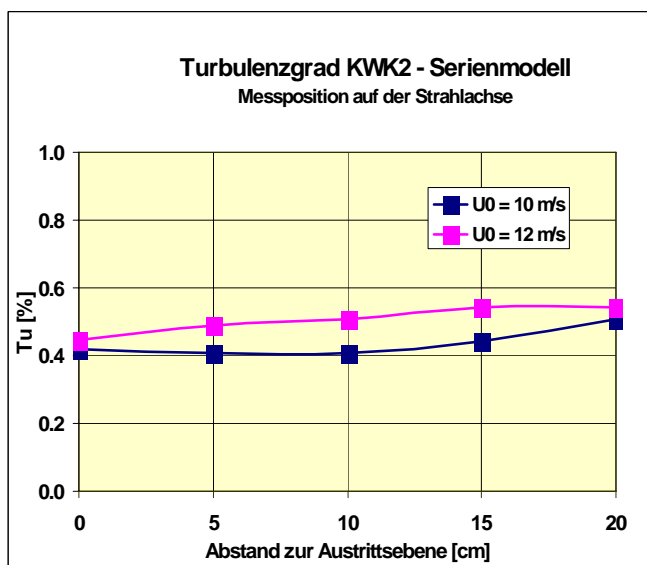
Gemessen werden Geschwindigkeit und Turbulenzgrad auf der Strahlachse in 0.1 m Entfernung von der Austrittsebene des Luftstroms. In dieser Entfernung befinden sich auch die Messobjekte.

### 2. Turbulenzgrad

Der Turbulenzgrad ist bestimmt worden mit einer Strömungssonde für absolute Geschwindigkeitsmessung. Die Messrate betrug 1000/s bei einer Messzeit von 10 s, also für jede Messung  $N = 10000$  Werte. Gemessen wurde auf der Strahlachse an fünf verschiedenen Positionen. Für die Messposition 10 cm stromab der Austrittsebene sind die Angaben in die Beschreibung der technischen Daten übernommen worden. An dieser Position befinden sich auch die Messobjekte. In der nebenstehenden Grafik ist der Turbulenzgrad in Prozentwerten angegeben. Berechnet wird der Turbulenzgrad  $Tu$  aus  $N$  Messungen  $u_n$  der Geschwindigkeit nach folgender Definition:

$$Tu = \frac{1}{\bar{u}} \sqrt{\overline{u'^2}} \quad \text{mit} \quad \overline{u'^2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} (u_n - \bar{u})^2 \quad \text{und} \quad \bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} u_n$$

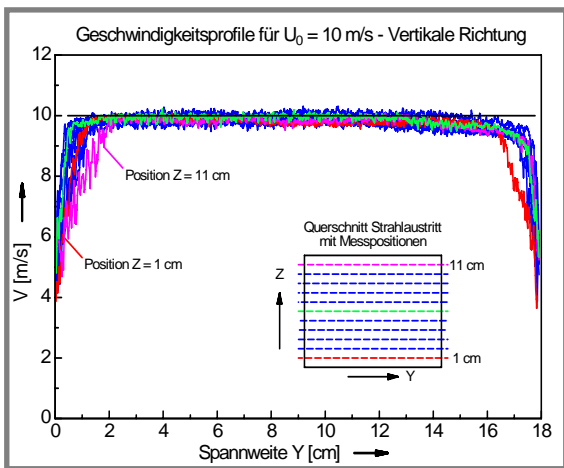
Dabei ist eine so genannte isotrope Turbulenz unterstellt, bei der die Schwankungsgrößen in allen drei Richtungen gleich sind. Tatsächlich gemessen sind aber nur die Schwankungen in x-Richtung.



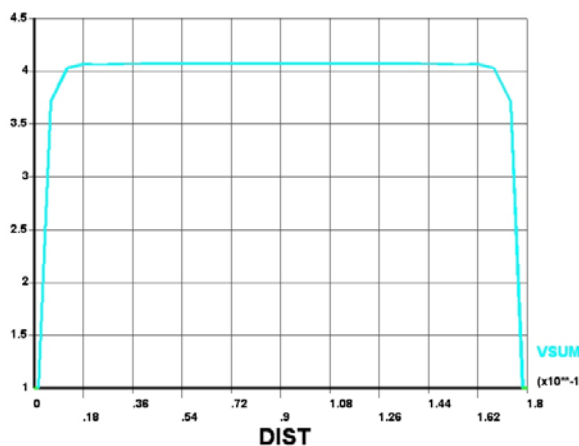
Der Turbulenzgrad kennzeichnet die Qualität der Strömung. Aus physikalischer Sicht wünschenswert ist ein noch kleinerer Turbulenzgrad um 0.1 %. Dazu wäre eine Beruhigungskammer erforderlich. Die Beruhigungskammer hat einen großen Querschnitt, durch den der Druck der Strömung zu- und die Geschwindigkeit abnimmt. Dabei verlieren sich weitgehend die Fluktuationen in der Strömung. Das Serienmodell des KWK2 sieht diesen Aufwand nicht vor. Das Segment Beruhigungskammer mit der Aufweitung des Strahls müsste größer sein als der gesamte Kanal in seiner bestehenden Form. Aus konstruktiver Sicht besteht jedoch kein Hinderungsgrund, eine solche Beruhigungskammer zwischen Antriebseinheit und Kontraktionsstrecke einzusetzen.

### 3. Geschwindigkeitsprofil der Strömung

Für den Prototyp des KWK2 ist das Geschwindigkeitsprofil des austretenden Strahls vermessen worden. Die nachfolgende Grafik zeigt die Messung am Strahlaustritt im Vergleich mit einer theoretischen Berechnung, die mit dem Strömungslöser FLOTRAN des Analyse- und Entwurfsprogramms ANSYS durchgeführt worden ist. In der theoretischen Rechnung ist die Austrittsgeschwindigkeit  $U_0$  auf die Eintrittsgeschwindigkeit bezogen, wodurch sich ungefähr die vierfache Austrittsgeschwindigkeit ergibt.



Geschwindigkeitsprofil des Prototyps des KWK2 am Strahlaustritt



Theoretisch berechnetes Geschwindigkeitsprofil am Strahlaustritt

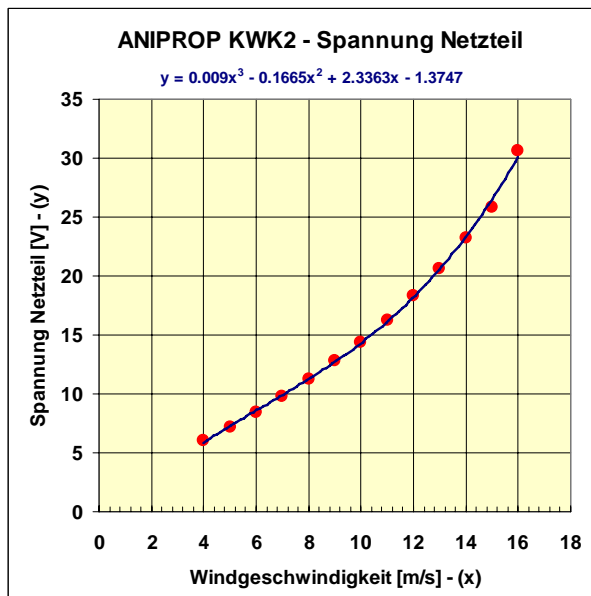
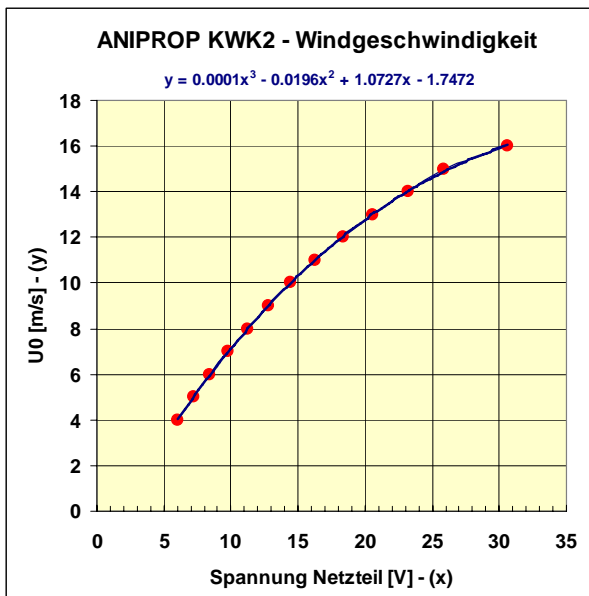
Die gemessene Grafik zeigt eine gewisse Schiefe der Geschwindigkeitsprofile am oberen und unteren Rand, die auf leichte Baumängel des Prototyps zurückzuführen sind. Die Grafik zeigt, dass die Geschwindigkeitsschwankungen zum Rand hin zunehmen. Im Mittelbereich des Querschnitts ergibt sich eine gleichförmige Verteilung der Geschwindigkeit mit vergleichbarem Turbulenzgrad wie auf der Strahlachse. Innerhalb eines Querschnitts mit etwa 1 cm Abstand von den seitlichen Rändern lassen sich Messungen durchführen.

### 4. Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Spannungsversorgung

Die nebenstehende Tabelle stellt dar, welche Geschwindigkeit sich auf der Strahlachse 10 cm hinter dem Strahlaustritt einstellt. Bei der Angabe ist zu beachten, dass der Raum einen gewissen Einfluss hat, in dem der Kanal aufgestellt ist. Da die ausgeblasene Luft von den

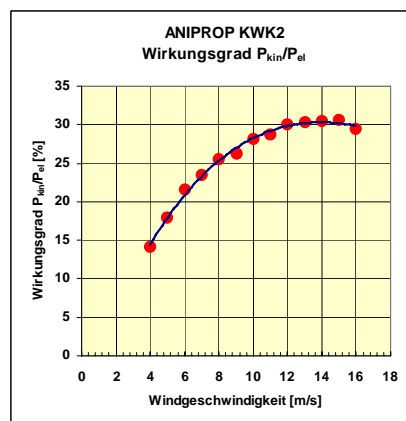
[m/s]	[V]
4	6.05
5	7.20
6	8.40
7	9.80
8	11.20
9	12.80
10	14.40
11	16.30
12	18.35
13	20.60
14	23.20
15	25.85
16	30.60

Spannung und Geschwindigkeit



Lüftern wieder angesaugt wird, können Strömungshinder- nisse im Raum geringfügig andere Werte ergeben. Die beiden obigen Grafiken zeigen die Abhängigkeit noch ein- mal in beiden Richtungen.

Nimmt man die Werte für die Geschwindigkeit auf der Strahlachse als nominellen Wert über den gesamten Quer- schnitt, so lässt sich der Wirkungsgrad des Kanals näherungsweise ermitteln. Als Wirkungsgrad wird das Verhält- nis von gewonnener kinematischer Leistung des Luft- strahls zu aufgebracht elektrischer Leistung bezeichnet. Faktisch ist der Wirkungsgrad etwas ungünstiger, da im Randbereich die Geschwindigkeit abnimmt.



### C. Aufbau und Betrieb des Kanals

1. Liste aller Bauteile mit Bezeichnungen

Bauteil	Bemerkungen
<b>Antriebseinheit mit Netzteil 30 V, 10 A</b>	Dazu gehören als weitere Teile: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kabel 220 V für Netzteil</li> <li>- Beutel Feinsicherungen für Netzteil</li> <li>- 2 x Laborkabel 4 mm und 1 m Länge in der Farben rot und blau</li> </ul>
<b>Kontraktionsstrecke</b>	Zubehörteil <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verschlusschraube für Kanaldurchführung (Dampfrohr)</li> <li>- (weitere Teile bei den Experimenten)</li> </ul>
<b>Messtisch</b>	Acrylplatte 12 mm und 280 x 400 mm <sup>2</sup> Dazu gehören als weitere Teile:



	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 x H-Fuß</li> <li>- 1 x Kurze Stativstange<sup>2</sup> L = 140 mm</li> <li>- 3 Doppelmuffen</li> </ul>
<b>Experimentierschiene mit zwei Haltungen für</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Experiment Visualisierung der Randwirbel</b></li> <li>- <b>Experiment Geschwindigkeitssensor</b></li> </ul>	Stativstange L = 860 mm Dazu gehören als weitere Teile: <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 x Stativstange L = 300 mm</li> <li>- 2 x Stativstangen L = 350 mm</li> <li>- 1 x Kurze Rundstange L = 80 mm</li> <li>- 6 x Doppelmuffen</li> <li>- 1 x Drehmuffe</li> </ul>
<b>Experiment Visualisierung der Randwirbel</b>	Dazu gehören als Teile: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dampfrohr mit Bajonettanschluss</li> <li>- Dampferzeuger mit 220 V Kabel</li> <li>- Einfüllbecher für Wasser</li> <li>- Diapositiv mit Spalt 0.5 mm</li> </ul>
<b>Experiment Geschwindigkeitssensor</b>	Dazu gehören als Teile: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensor mit Fassung für Wolframwendel und BNC Anschluss</li> <li>- Kästchen mit Ersatzwendeln</li> <li>- Anschlusskasten mit Regler</li> <li>- BNC Kabel 1 m</li> <li>- 2 x Laborkabel 4 mm und 1 m Länge in der Farben rot und blau</li> </ul>

## 2. Übersicht über die Reihenfolge beim Aufbau

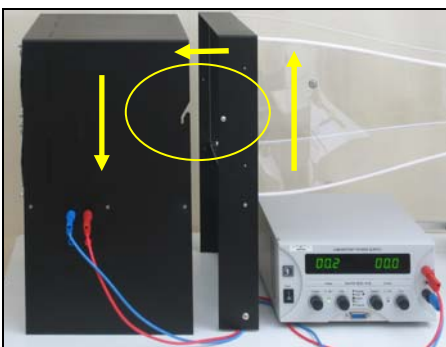
1. Für den Aufbau des Kanals werden Antriebseinheit und Kanal nebeneinander auf den Experimentiertisch gestellt und anschließend zusammengefügt (siehe Abschnitt 3).
2. Der H-Fuß wird aufgestellt mit kurzer Stativstange und Doppelmuffe.
3. Der Messtisch aus Acryl erhält zwei Doppelmuffen auf derjenigen Stirnseite, zu der die Durchführungen dichter liegen.
4. Der Messtisch wird so eingesetzt, dass die Oberseite etwa 110 mm über dem Experimentiertisch endet.
5. Für die Experimentierschiene wird im H-Fuß die Stativstange L=300mm mit Doppelmuffe eingebaut.
6. An der Stütze für die Kontraktionsstrecke wird eine Doppelmuffe mit runder Stativstange L=80mm aufgesetzt. Weitere Doppelmuffe am anderen Ende.
7. Experimentierschiene wird an die beiden Doppelmuffen am H-Fuß und der Stütze für die Kontraktionsstrecke befestigt, so dass deren Achse parallel zum Messtisch verläuft.

<sup>2</sup> Die Stativstangen sind Aluminiumstäbe mit quadratischem Querschnitt 12 x 12 mm<sup>2</sup>; L steht für Länge.

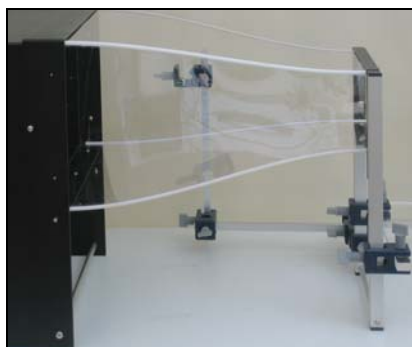
8. Die Halterung für das Dampfrohr wird unter Verwendung der Stativstange  $L=350\text{mm}$  und zwei Doppelmuffen an der Experimentierschiene in Höhe der Einlassbohrung in der Seitenwand der Kontraktionsstrecke aufgesetzt. Die zweite Doppelmuffe nimmt das Dampfrohr auf.
9. Die Halterung für den Geschwindigkeitssensor wird unter Verwendung der zweiten Stativstange  $L=350\text{mm}$  und einer Doppelmuffe an der Experimentierschiene befestigt. Die Drehmuffe nimmt die Führung für den Geschwindigkeitssensor auf.
10. Die elektronische Waage und der Lagerblock für die beiden Lagerschalen des Supports werden an den entsprechenden Bohrungen unter den Messtisch gestellt.
11. Der Support mit seinen vier Stützen wird vorsichtig auf die Stifte auf der Waage und den Lagerblock gestellt.
12. Die ebene Platte wird eingesetzt in die Halterung des Supports.
13. Die Antriebseinheit wird mit den beiden Kabeln an das Netzteil angeschlossen.

**Der Windkanal ist nunmehr betriebsbereit.**

### 3. Zusammenfügen von Antriebseinheit und Kontraktionsstrecke



Nut und Stift werden durch Anheben verbunden.



Baugruppen sind zusammengefügt.



Nachfolgender Messtisch mit Doppelmuffen.

Für das Zusammenfügen von Antriebseinheit und Kontraktionsstrecke wird letztere leicht angehoben, so dass die Stifte an der Kontraktionsstrecke auf beiden Seiten in die vorgesehenen Nuten eingelassen werden können. Damit sind beide Baugruppen in festem Verbund.

- **Achtung.** Der Rückstoß der Antriebseinheit ist bei voller Leistung so groß, dass sie umgestoßen wird. Deshalb muss sie vor dem Betrieb mit der Kontraktionsstrecke verbunden oder auf andere Weise befestigt werden.

### 4. Anbau des Messtisches

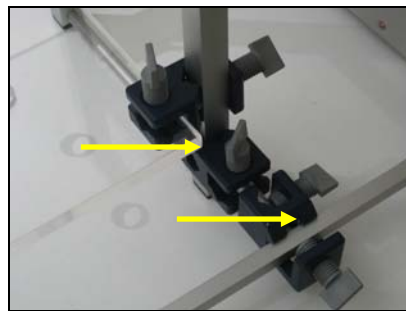
Der Messtisch wird von drei Doppelmuffen gehalten, von denen zwei an der Stütze der Kontraktionsstrecke befestigt werden. Für die dritte Muffe dient der H-Fuß. In den H-Fuß wird

die kurze Stativstange L=140mm in die mittlere Öffnung im „Querstrich“ des H eingesetzt. Die Doppelmuffe wird so befestigt, dass die Acrylplatte eingeschoben und von oben angezogen werden kann. Die Abbildungen zeigen die Position und Orientierung der Doppelmuffen.

- **Hinweis.** Lage und Orientierung der Schrauben der Doppelmuffen müssen genau beachtet werden. Die Doppelmuffen haben jeweils zwei unterschiedliche Durchlassweiten. Die Schrauben behindern sich bei falschem Einsetzen gegenseitig (siehe bildliche Darstellung). Die Doppelmuffen, die an der Stütze für die Kontraktionsstrecke sitzen, müssen beim Fixieren mit ihrer breiteren Öffnung sorgfältig auf die 20 x 20 mm<sup>2</sup> Stützstäbe geschoben sein und beim Anziehen der Klemmschrauben festgehalten werden.



Die 20 mm Öffnung wird über die Stütze geschoben. Die schmale Öffnung hält den Messtisch.



Die runde Stativstange L= 80mm wird jeweils durch beide Muffen bis zum Anschlag durchgeschoben.



Die L=300mm Stativstange liegt quer im H-Fuß und nimmt das Ende der Experimentierschiene auf.

### 5. Experimentierschiene mit Anbauten

Die Experimentierschiene ist in ihrer Höhe durch die Einbauhöhe am H-Fuß festgelegt. Die Höhe an der Stütze für die Kontraktionsstrecke muss daran ausgerichtet werden. Die Unterkante der Muffe am H-Fuß liegt nicht ganz am Boden auf, sondern bildet einen 3 mm Spalt zum Experimentiertisch. Möchte man ein zufälliges Kippen des H-Fußes zuverlässig vermeiden, kann man eine kleine Platte mit 3 mm Stärke unter die Muffe schieben. Die gleiche Wirkung erzielt man aber auch, wenn die Stativstange für das Dampfrohr bis auf die Höhe des Experimentiertisches herabgelassen und in dieser Position fixiert wird.

### 6. Support und Aufsetzen des Supports

Der Support ist für die Durchführung der meisten Experimente gedacht. Er nimmt die Messobjekte auf, u.a. die mitgelieferte ebene Platte. Der Support ruht in zwei Lagerschalen auf der Waage und dem Lagerblock. Die Wägeplatte der Waage ist mit zwei Stiften im Abstand von 70 mm präpariert, die einen Durchmesser von 3 mm haben. Je nach Messung wird an der vorderen oder hinteren Lagerschale gemessen. Die andere Lagerschale ruht auf dem Lagerblock aus



Support mit Messobjekt, Stütze mit Schraubfassung zur Fixierung an der Waage

Acryl. Die beiden Schrauben in dem Lagerblock lassen sich durch Drehen vertikal verschieben. Die Stützen lassen auf den Lagerschalen drehen und verschieben. Dadurch kann der Support mit allen vier Stützen ohne Lagerspiel gelagert werden. Die vordere linke Stütze hat eine Schraube, mit der die vordere Lagerschale an der Waage bzw. dem Stift auf der Wägeplatte fixiert werden kann. Diese Fixierung ist notwendig, da die Auftriebskraft zusammen der Widerstandskraft so groß werden kann, dass der Support angehoben und die Messung verfälscht wird.

Die eine Seite des Supports enthält eine

#### Gradeinteilung:

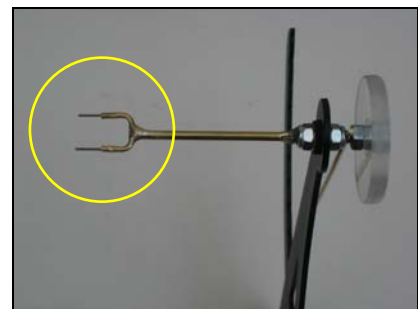
- Die Gradeinteilung reicht von  $+50^\circ$  bis  $-90^\circ$ , bezogen auf den Anstellwinkel einer Tragfläche.
- Die Gradeinteilung ist mit kleinen Marken im Abstand von 5 Grad, mit größeren Marken im Abstand von  $15^\circ$  unterteilt.
- Durch eine entsprechend aufgebrachte Skala können auch feinere Einteilungen vorgenommen werden. Das Skalenband ist 15 mm breit mit 120 mm und 135 mm Radius der Ränder.



Stifte zur Aufnahme von Messobjekten



Stellrad für Anstellwinkel mit Winkelanzeige



Detail der drehsicheren Haltestifte

Die Stahlstifte für die Messobjekte haben einen Durchmesser von 1 mm und stecken 10 mm tief im Messobjekt. Die Stifte ihrerseits stecken in Röhrchen, die einen Durchmesser von 2 mm haben. Die Spannweite des Messobjekts beträgt 100 mm.

- **Hinweis.** Sollen andere Messobjekte mit einer kleineren Spannweite vermessen werden, dann muss der einzelne Haltestift auf einer Seite verlängert werden. Eine solche Verlängerung kann leicht selbst gefertigt werden oder wird zu einem günstigen Preis nachgeliefert<sup>3</sup>.

Die eine Seite der Halterung ist als Gabel ausgebildet, damit die Messobjekte sich nicht um die Lagerachse verdrehen können. Das Stellrad für den Anstellwinkel ist so eingestellt, dass der Winkel leicht verstellt werden kann, der Luftstrom aber noch kein Verdrehen bewirkt.

Das **Einsetzen des Messobjekts** geschieht in zwei Schritten: Erst wird das Messobjekt auf der Seite mit den Doppelstiften aufgeschoben. Durch leichtes Spreizen der beiden Seitenteile

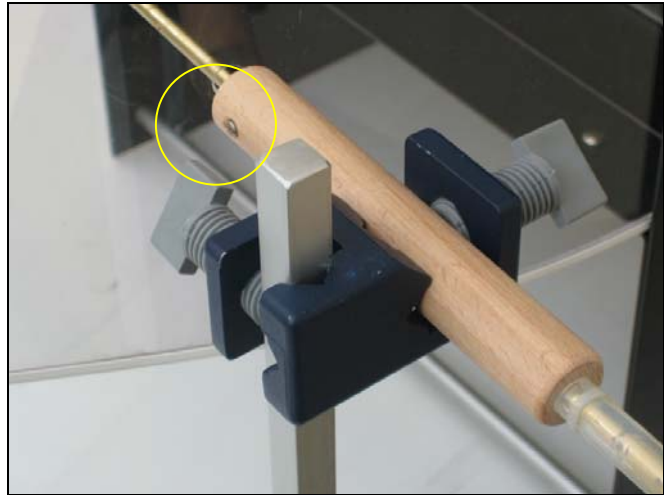
<sup>3</sup> Es sind weitere Messobjekte als Angebot in Vorbereitung. Zu diesen Messobjekten wird der passende Haltestift mitgeliefert.

des Supports wird nun der einzelne Dorn in die Aufnahmebohrung eingeführt und durch Nachlassen der Spreizung eingeklemmt.

## D. Mitgelieferte Experimente

### 1. Experiment Visualisierung der Randwirbel

Am Ende der Experimentierschiene wird für dieses Experiment das **Dampfrohr** eingesetzt. Dazu wird die Abdeckschraube in der Mitte der Seitenwand der Kontraktionsstrecke zuvor entfernt. Durch diese Öffnung wird das Dampfrohr – zunächst ohne Dampf – geschoben und justiert. Die Längsposition in Richtung der Strahlachse wird an der unteren Doppelmuffe vorgenommen, die Höhenposition an der oberen Doppelmuffe. Das Dampfrohr sitzt richtig, wenn es in leicht eingespanntem Zustand horizontal und vertikal den Kanalachsen folgt.



Doppelmuffe mit Dampfrohr und Ausrichtung der Schraube in Richtung Tragfläche

Die vertikal eingebaute Stativstange sollte auf dem Boden aufsetzen, um der Versuchseinrichtung zusätzliche Stabilität zu geben. Ist das Dampfrohr in der richtigen Position eingesetzt, dann wird es für das Experiment zunächst wieder entfernt.

Sodann wird es an den Dampferzeuger mit der Bajonettfassung angeschlossen. Der **Dampferzeuger** soll mit 450 ml Wasser entsprechend der separaten Betriebsvorschrift gefüllt sein. Der elektrische Anschluss des Dampferzeugers kann nun in eine 220 V Steckdose gesteckt werden. Er ist danach in wenigen Minuten betriebsbereit.

- **Achtung.** Bei elektrisch angeschlossenem Dampferzeuger steht dieser unter Dampf. Beim Drücken des Betriebsschalters strömt sofort heißer Dampf aus den Düsen des Dampfrohrs. Das Dampfrohr vom Körper halten und nicht auf eine andere Person richten.

**Dampfrohr nur am isolierenden Holzgriff anfassen.**

Vor der Visualisierung mit Hilfe des eingeleiteten Dampfes wird der Kanal eingeschaltet und auf eine Geschwindigkeit von ungefähr 10 m/s eingestellt. Wird der Druckknopf am Dampferzeuger gedrückt, dann richtet man das Dampfrohr für ungefähr eine halbe Minute auf den Boden über ein dort bereit gelegtes Tuch, das das kondensierte Wasser aufnehmen kann. Danach sind Schlauch und Düse so heiß, dass man sie in die Öffnung des Kanals einführen kann. Die Betriebszeit für eine Füllung ist 8 bis 10 Minuten. Der Schalter des Dampferzeugers ist zur Sicherheit ein Druckknopfschalter, der beim Loslassen die Dampfzuführung sofort unterbricht. Es empfiehlt sich deshalb, eine zweite Person um das Bedienen des Dampferzeugers zu bitten.

- **Hinweis.** Der aus dem Kanal austretende Dampf ist soweit abgekühlt, dass er keinerlei Gefahr mehr darstellt. Die feinen Tröpfchen werden dazu benutzt, durch eine Lichtebene quer zur Strahlrichtung hinter der Tragfläche die Randwirbel zu visualisieren. Die Bildung von **Kondenswasser** im Kanalboden und außerhalb des Kanals ist normal und richtet keinen Schaden an. Nach dem Experiment kann das Wasser an der Tragfläche, dem Messtisch und im Kanal mit einem weichen, saugfähigen Tuch abgetrocknet werden.

Am hölzernen Griff des Dampfrohrs befindet sich eine Metallschraube. Die Schraube zeigt in Richtung der Austrittsöffnungen des Dampfes und sollte folglich in Richtung Tragfläche zeigen.

Um die Randwirbel gut sichtbar zu machen, muss eine Ebene quer zur Strahlrichtung hinter der Tragfläche mit Licht ausgeleuchtet werden. Zudem muss der Beobachtungsraum gut abgedunkelt sein. Die **Lichtebene** wird mit dem beigefügten Diapositiv mit Spalt, das von einem seitlich vom Kanal aufgestellten Diaprojektor abgestrahlt wird, oder einer anderen Spaltlichtquelle erzeugt. Der Spalt wird auf die Mitte hinter der Tragfläche scharf eingestellt.



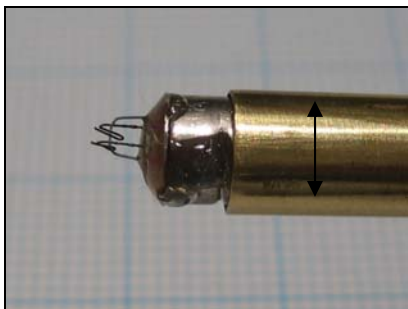
Lichtebene hinter der Tragfläche

Die Randwirbel treten auf, sobald die Tragfläche einen Anstellwinkel von 10 bis 15 Grad erhält. Der Wechsel von positivem zu negativem Anstellwinkel bringt eine Umkehrung der Orientierung der Wirbel<sup>4</sup>. Die Wirbel zeigen eine ausgeprägte Stabilität. Werden der Diaprojektor oder die Spaltlichtquelle drehbar gelagert, dann kann die Lichtebene weiter entfernt von der Hinterkante die Strömung ausleuchten. Die Randwirbel „stehen“ auch noch mehr als einen Meter hinter der Tragfläche gut sichtbar im Raum.

## 2. Experiment Geschwindigkeitssensor

Der Geschwindigkeitssensor ist die Wendel einer Miniaturglühlampe (handelsübliche Ausführung 5.5 mm Durchmesser, 12 V, 0.08 A), deren Glaskolben entfernt worden ist. Die Fassung für die Glühlampe befindet sich an einer 300 mm langen, dünnen Halterung, die seitlich an der Experimentierschiene in die Drehmuffe eingespannt wird.

<sup>4</sup> Die theoretischen Grundlagen und die einzelnen Phasen der Beobachtung werden an dieser Stelle nicht weiter erläutert. Filme und Erläuterungen dazu: [www.aniprop.de/aniprop\\_kwk1\\_3dwirbel.html](http://www.aniprop.de/aniprop_kwk1_3dwirbel.html)



Kopf des Sensors, Ø 5.5 mm



Haltestange



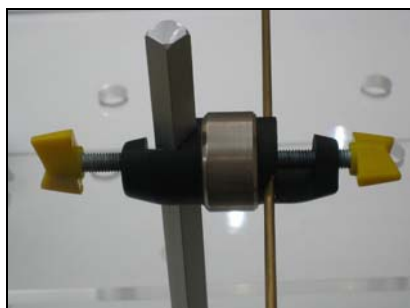
Einspannung in Drehmuffe

Der Metallstiel gleitet in einer 40 mm langen Metallfassung, die ihrerseits erst in die Drehmuffe eingeklemmt wird. Dadurch kann in einer Ebene quer zum Luftstrom durch Drehen und Verschieben jeder Punkt im Luftstrom erreicht werden. In Stromrichtung wird die Doppelmuffe auf der Experimentierschiene versetzt. Die Drehmuffe hat zwei Schrauben, von denen die Klemmschraube für die Halterung des Sensors voranstehend abgebildet ist. Die zweite Schraube befestigt die Drehmuffe an der senkrechten Stativstange.

- **Hinweis.** Die Doppelmuffe hat zwei unterschiedliche Einspannungen. Eine der Einspannungen hat gegenüber der Schraube einen Metallblock, durch den die andere Seite mit der Sensorführung eingeklemmt wird. Die senkrechte Stativstange L=350 mm muss dazu um 45° verdreht eingesetzt sein. Mehr oder weniger starkes Anziehen der Schraube an der Stativstange führt zu einem unterschiedlich leichten Verdrehen des Sensorstiels. Die Seite, auf der der Sensor eingespannt wird, hat keinen Metallblock in der Mitte gegenüber der Schraube.



Position der Stativstange



Einspannung Doppelmuffe



BNC Anschluss Sensor<sup>5</sup>

Die elektrische Versorgung des Sensors geschieht über die Gleichspannung, die auch an der Antriebseinheit die Motoren antreibt. Zur Abnahme der Spannung sind unterhalb der großen Anschlussbuchsen für die Motoren zwei weitere Buchsen für 4 mm Laborstecker vorgesehen. Die Buchsen sind rot und blau für Plus und Minus gekennzeichnet. An diesen Buchsen wird die Versorgungsspannung für den Sensor abgenommen.

- **Achtung.** Die Kabel für die Versorgungsspannung des Sensors dürfen erst eingesteckt werden, wenn der Windkanal angelaufen ist. Da die Windgeschwindigkeit nicht gleich mit dem Anschalten erreicht wird, brennt die Wendel des Sensors durch. Dagegen ist das Ausschalten des Kanals mit eingesteckten Versorgungskabeln unproblematisch.

<sup>5</sup> Ab 04/2008 entfällt der BNC-Anschluss. Die neue Ausführung der Sonden hat ein 1.5 m langes Kabel.

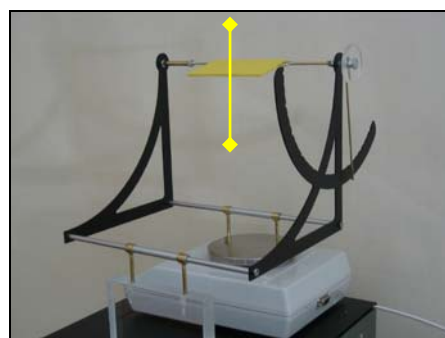
Die Versorgungsspannung, der Sensor selbst und die Signalspannung werden in einem kleinen **Anschlusskasten** miteinander verknüpft, der im nächsten Abschnitt erklärt wird.

Die Steuerung der Vorsorgung des Sensors über die Spannung für die Motoren hat den Vorteil, dass beim Ausschalten des Kanals auch der Sensor stromlos ist.

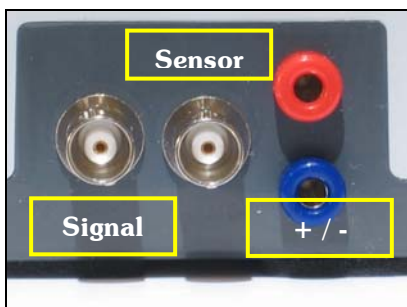
### 3. Messungen mit dem Geschwindigkeitssensor

Der Anschlusskasten für den Sensor hat Anschlüsse für die Spannungsversorgung, den Sensorstrom und die Signalspannung. Die **Signalspannung** ist ein Maß für die relative Geschwindigkeit im Strömungsfeld; sie kann entweder über ein Messgerät als Mittelwert oder an einem Oszilloskop dargestellt werden. Die Anschlüsse befinden sich auf der einen der beiden Stirnseiten des Anschlusskastens (siehe Abbildungen auf der nächsten Seite). Auf der anderen Seite ist der Regelknopf für einen Regelwiderstand angebracht, mit dem die Signalspannung mehr oder weniger empfindlich eingestellt werden kann.

Die Spannungsversorgung erfolgt über Laborstecker. Signalspannung und Sensorstrom stehen an den beiden BNC Buchsen zur Verfügung. Die mittlere BNC Buchse führt zum Sensor. Die Signalspannung wird an einer Widerstandsbrücke abgenommen, in deren beiden Verzweigungen der Regelwiderstand und die Wendel liegen. Haben Regelwiderstand und Wendel den gleichen Widerstand, wird keine Spannung angezeigt. Da unterschiedliche Geschwindigkeiten aber eine unterschiedliche Abkühlung der Wendel bewirken, zeigt die Brückenspannung bereits geringste Schwankungen der Geschwindigkeit an. Das rechte Bild in der nachfolgenden Bildreihe zeigt ein typisches Signal an. Der Sensor fährt dabei hinter der Hinterkante in der Mitte der Tragfläche, die keinen Anstellwinkel eingestellt hat, von einem Punkt oberhalb zu einem Punkt unterhalb der Tragfläche (siehe nebenstehendes Bild). Die Empfindlichkeit des Oszilloskops ist auf 0.1 V/div eingestellt worden. Man sieht in dem Zeitschrieb einerseits die Schwankungen als Folge der Turbulenz in der Strömung. Passiert der Sensor die Verlängerung der Hinterkante, dann nimmt die Geschwindigkeit in einem schmalen Bereich zu beiden Seiten der Platte drastisch ab. Die Abnahme der Geschwindigkeit ist Folge der so genannten Grenzschicht zwischen Strömung und Oberfläche. Die Luft „haftet“ direkt an der Oberfläche als Folge der Viskosität der Luft.



Weg der Sonde



Anschlusskasten mit Eingängen



Einstellen für den Abgleich der Empfindlichkeit

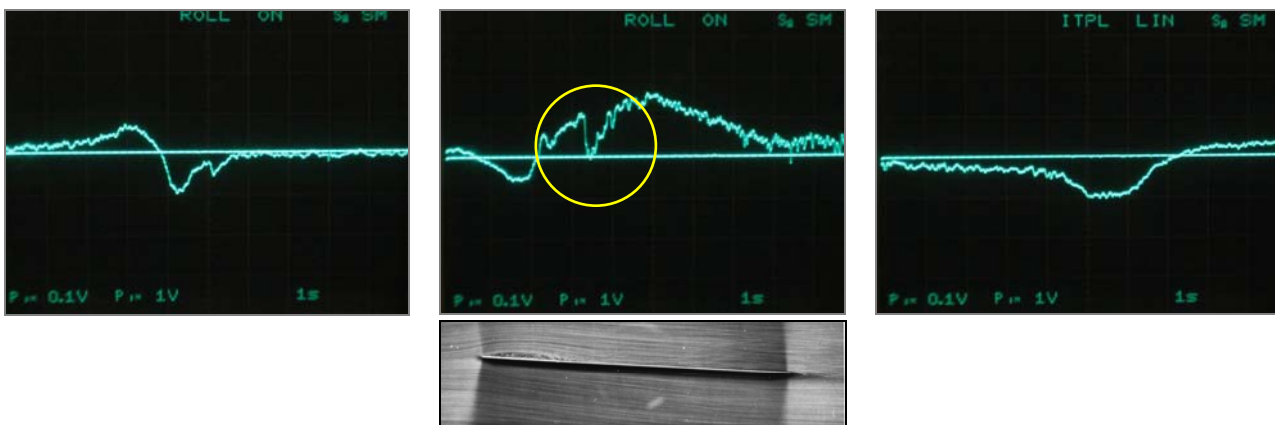


Typisches Signal: Grenzschicht an der Hinterkante



- **Achtung.** Ist der Sensor an die Spannungsversorgung angeschlossen, dann darf er nicht mehr aus dem Luftstrom entfernt werden. Der Speisestrom ist so groß, dass die Wendel ohne Kühlung durchbrennt. Der Strom ist nicht geregelt wie bei einem kommerziellen Hitzedrahtanemometer.

Der **Abgleich des Reglers** erfolgt in der Weise, dass für die gewählte Windgeschwindigkeit die Spannung näherungsweise auf null geregelt wird. Dabei handelt es sich bei „null“ um den Wert, der auch optisch am Oszilloskop dem Mittelwert der Schwankungen entspricht. Als Geschwindigkeit sollte ein Wert bei etwa 10 m/s gewählt werden. Der Regler hat eine kleine Klemmschraube, mit der ein zufälliges Verdrehen verhindert werden kann. Je empfindlicher die Anzeige am Oszilloskop eingestellt wird, desto deutlicher sieht man die Schwankungen, aber auch die großräumigen Veränderungen treten immer deutlicher zutage. Die Erfahrung zeigt, dass eine Empfindlichkeit von 0.1 – 0.2 V/div („div“ ist die typische Teilung auf einem Oszilloskop) ein guter Kompromiss zwischen Empfindlichkeit und Sichtbarkeit von Veränderungen ist. Mit dem Sensor lassen sich die Änderungen des Geschwindigkeitsfeldes in der Umgebung der Tragfläche nachweisen, die Folge der Umströmung einer ebenen Platte oder eines Profils sind. Von besonderem Interesse ist dabei der Vergleich zwischen theoretischen Rechnungen und experimentellen Befunden<sup>6</sup>. Es zeigt sich, dass die wesentlichen Merkmale theoretischer Lösungen der Umströmung von Tragflächen in den Experimenten nachgewiesen werden können. Die nachfolgenden Bilder zeigen einige Geschwindigkeitsverläufe, die mit dem einfachen Geschwindigkeitssensor aufgenommen worden sind. Benutzt wurde ein Zweistrahloszilloskop. Die Nullachse ist zur Verdeutlichung des Mittelwerts der Anströmgeschwindigkeit mit Hilfe des zweiten Strahls eingblendet worden:



Vorderkante: Von der Oberseite zur Unterseite

Oberhalb der Vorderkante über die Platte (s.u.)

Unterseite: Unterhalb der Platte stromab

Das mittlere Bild ist außerordentlich interessant. Die ebene Platte zeigt schon bei kleinen Anstellwinkeln die Tendenz zur Ablösung der Strömung auf der Oberseite. Es entsteht eine kleine „Ablöseblase“. Das unterlegte Bild ist Abb. 35 aus dem Buch *An Album of Fluid Motions* von Milton Van Dyke (The Parabolic Press, Stanford 1982). Der markierte Einbruch

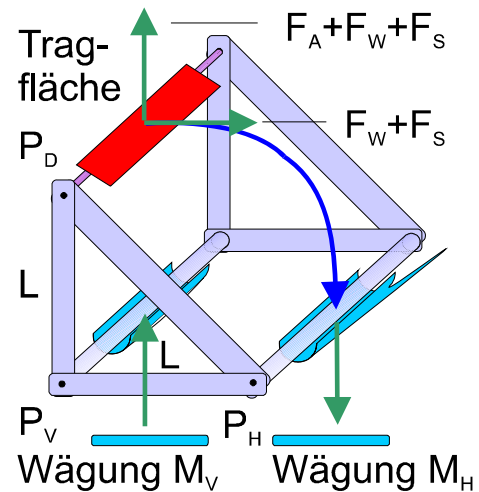
<sup>6</sup> Die Arbeit von W. Send auf der DPG Jahrestagung 2007 zeigt die zugehörigen theoretischen Ergebnisse: [www.aniprop.de/DPG07\\_DD\\_16\\_3\\_Send.pdf](http://www.aniprop.de/DPG07_DD_16_3_Send.pdf)

in der Geschwindigkeit kurz hinter der Vorderkante auf der Oberseite deutet darauf hin, dass die verwendete Platte sich im Experiment ähnlich verhält. Durch die Größe der Wendel ist die Auflösung der Details nicht besser als ungefähr 2-3 mm.

#### 4. Messungen mit der Waage

Das nebenstehend noch einmal dargestellte Messprinzip des KWK2 ist Folge der Absicht, Kraftmessungen mit einer handelsüblichen elektronischen Waage machen zu wollen. An der vorderen Lagerschale mit der Drehachse  $P_V$  liegt im Ruhezustand ohne Wind ein Teil  $M_{V0}$  der Masse des Supports auf. An der hinteren Lagerschale mit der Drehachse  $P_H$  liegt die Masse  $M_{H0}$  auf. Beide Anteile ergeben zusammen die Masse  $M_0 = M_{V0} + M_{H0}$  des Supports einschließlich des eingebauten Messobjekts.

- Es ist nicht erforderlich, vor einer Messung die Tara Funktion der Waage zu betätigen.



Messprinzip des Supports

Es genügt, die Daten des Ruhezustands zu notieren oder mit der Messdatenerfassung aufzuzeichnen. Als Kraft an der vorderen Lagerschale wirken das anteilige Gewicht des Supports  $g \cdot M_{V0}$ , vermindert um den Strömungswiderstand des Supports  $F_S$ , die Auftriebskraft  $F_A$  der Tragfläche und den Strömungswiderstand  $F_W$  der Tragfläche. Mit  $g$  ist die Schwerebeschleunigung ( $9.806 \text{ m/s}^2$ ) bezeichnet:

$$g \cdot M_V = g \cdot M_{V0} - F_S - F_W - F_A$$

An der hinteren Lagerschale wirken das anteilige Gewicht des Supports und die Anteile am Strömungswiderstand:

$$g \cdot M_H = g \cdot M_{H0} + F_S + F_W$$

Man übersieht sofort, dass die Auftriebskraft sich durch Addieren der beiden Gleichungen ergibt:

$$F_A = g \cdot (M_0 - M_V - M_H)$$

Der Widerstand des Messobjekts lässt sich allein durch eine Messung an der hinteren Lagerschale ermitteln:

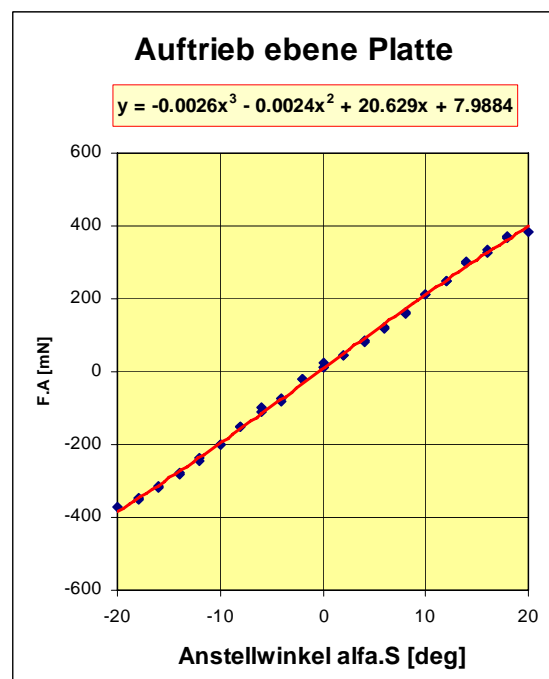
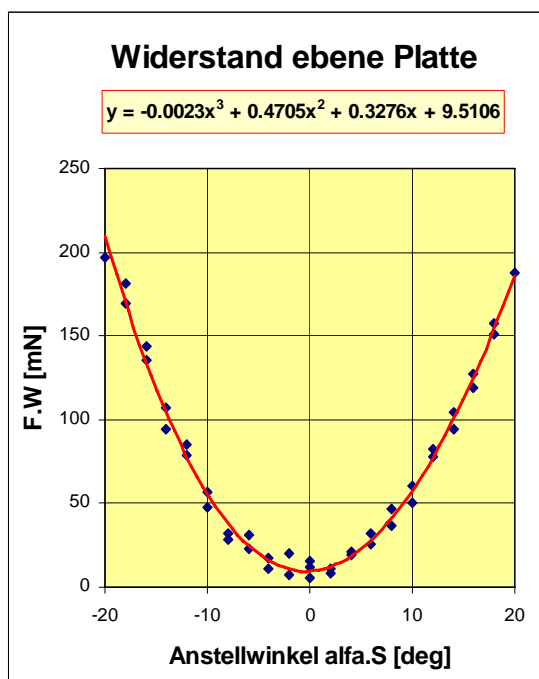
$$F_W = g \cdot (M_H - M_{H0}) - F_S$$

- **Achtung:** Der Strömungswiderstand  $F_S$  des Supports muss vor Beginn der Messungen für ein Messobjekt einmal ohne Messobjekt vermessen werden. Der Wert ist zwar klein, aber nicht vernachlässigbar.

Das Gewicht des Supports verlangt eine Mindesttragfähigkeit der Waage. Für den Typ Kern 440-35A mit dem Messbereich bis 600g liegen die Ergebnisse der Messungen im mittleren Anzeigebereich. Die Auflösung von 0.01 g ermöglicht die Bildung von guten Mittelwerten. Durch die Schwankungen des Luftstroms ändert die Waage die Anzeige fortlaufend die Anzeige im Bereich 1/10 g. Die Auflösungsgrenze hat deshalb keine praktische Bedeutung für eine Einzelmessung im Kanal.

• **Hinweis.** Die Bedienung und Verwendung der Waage wird in der beigefügten Bedienungsanleitung ausführlich beschrieben und wird hier nicht wiederholt.

Für genaue Messungen empfiehlt sich die Verwendung eines PCs, um die Daten elektronisch erfassen zu können. Werden zwei Waagen gleichzeitig verwendet, so muss die Erfassung der Daten auch mit zwei PCs geschehen. Jedenfalls lässt die mitgelieferte Software die gleichzeitige Verwendung zweier Waagen derzeit nicht zu. Denkbar ist jedoch die Umschaltung zwischen den Waagen mit Hilfe eines Schalters zwischen den beiden Datenleitungen zur seriellen Schnittstelle. Die Ergebnisse in der Arbeit von W. Send, die zuvor zitiert wurde, sind dadurch beschafft worden, dass zunächst die Daten für die vordere Lagerachse, danach durch



Wiederholung der Einstellungen für den Anstellwinkel die Daten für die hintere Lagerachse gemessen worden sind. Dies Verfahren führt zu einer gewissen Streuung der einzelnen Werte.

5. Beispiele für Messungen mit der Waage

Die Ermittlung der prinzipiellen Zusammenhänge ist gleichwohl möglich, wie das voranstehende Ergebnis zeigt. Die Darstellung ist unter Verwendung der Software Microsoft Excel gewonnen worden. Die Windgeschwindigkeit betrug 12 m/s.

- Für den beim Anstellwinkel 0° gefundenen Widerstand lassen sich theoretische Untersuchungen durchführen, die in enger Beziehung zur so genannten Grenzschichttheorie

stehen. Die – hier nicht dargestellte - Auswertung zeigt den engen Zusammenhang zwischen den ermittelten Werten und der Theorie.

- Der Anstieg des Auftriebs über dem Anstellwinkel zeigt ebenfalls einen engen Zusammenhang zur theoretischen Lösung des Auftriebs für eine angestellte Platte. Es gibt jedoch Besonderheiten, die ihre Ursache in der vergleichsweise niedrigen Strömungsgeschwindigkeit und dem kleinen Verhältnis von Spannweite zu Flügeltiefe der vermessenen Platte zeigen.



### **Physik des Fliegens • Entwicklung und Bau von Versuchseinrichtungen • Thematische Beratung**

Firmenanschrift:  
ANIPROP GbR  
Dr. Wolfgang Send  
Sandersbeek 20  
D-37085 Göttingen  
e-✉ [wsend@aniprop.de](mailto:wsend@aniprop.de)  
Internet: [www.aniprop.de](http://www.aniprop.de)

Werkstatt:  
ANIPROP GbR  
Felix Scharstein  
Fidicinstraße 40  
D-10965 Berlin  
e-✉ [felix@scharstein.de](mailto:felix@scharstein.de)  
Internet: [www.scharstein.de](http://www.scharstein.de)

Bankverbindung:  
Dr. W. Send und  
F. Scharstein GbR  
Volksbank Göttingen  
BLZ 260 900 50  
Umsatzsteuer-IdNr.:  
DE192646977

Kontakt auch über:  
Dr. W. Send  
DLR-Institut für Aeroelastik  
Bunsenstraße 10  
D-37073 Göttingen  
e-✉ [wolfgang.send@dlr.de](mailto:wolfgang.send@dlr.de)  
Internet: [www.aniprop.de/dlrhp](http://www.aniprop.de/dlrhp)