



# **Kurzfassung der Diplomarbeit**

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluss der  
Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern  
für den Einsatz an Windkraftanlagen**

**Olga Deiss, Matr.-Nr.: 340479**

Studiengang Konstruktionstechnik

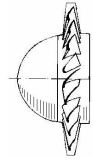
**Frank Lackmann, Matr.-Nr.: 338837**

Studiengang Energietechnik

**Erstprüfer: Prof. Dr. – Ing. Frank Kameier**

**Zweitprüfer: Dipl. – Ing. Christoph Hilling**

Düsseldorf, im Juli 2001



---

**Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier**

Institut für Strömungsmaschinen

Fachbereich 4

Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Josef-Gockeln-Str. 9

40474 Düsseldorf

Phone (0211) 4351-448

Fax (0211) 4351-509

E-Mail Frank.Kameier@fh-duesseldorf.de

Düsseldorf, den 20.11.2000

Thema einer Diplomarbeit  
für  
Frau Olga Deiss, Matr.-Nr.: 340479  
Herr Frank Lackmann, Matr.-Nr.: 338837

## **Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluss der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

Die Anströmgeschwindigkeit einer Windkraftanlage wird üblicherweise mit Halbschalenanemometern als 10 Minutenmittelwert bestimmt. Aufgabe dieser Diplomarbeit ist, unterschiedliche Anemometer (dänischer sowie deutscher Bauart) und Ultraschallanemometer bei verschiedenen Anströmbedingungen im Windkanal zu untersuchen. Insbesondere sollen die Einflüsse unterschiedlicher Turbulenzgrade und Turbulenzbedingungen (Anisotropie) ermittelt werden.

Zunächst ist der Windkanal des Instituts für Strömungsmaschinen hinsichtlich seiner aerodynamischen Qualität zu untersuchen und ggf. zu verbessern. Zur Messung des Strömungsprofils und des Turbulenzgrades eines Windkanals „Göttinger Bauart“ stehen Hitzdrahtanemometer und pneumatische Sonden zur Verfügung. Eine PC gesteuerte 3-Achsen-Traversierung der Firma ISEL dient zur Positionierung der Sonden.

Im zweiten Teil der Diplomarbeit soll eine Überprüfung des Kalibrierzertifikats verschiedener Anemometer durchgeführt werden. Die Turbulenzbedingungen des Windkanals sind dabei zu variieren. Insbesondere soll das Verhalten eines Ultraschallanemometers im Vergleich zu einem herkömmlichen Anemometer untersucht werden.

Die Arbeit teilt sich in folgende Schritte auf:

- Einarbeitung in die Literatur,
- Programmierung der Software zur automatisierten Erfassung der Messdaten (z.B. unter Visual Basic),
- Vorbereitung und Kalibrierung der Messtechnik,
- Vermessung des Geschwindigkeitsprofils,
- Erarbeiten von Verbesserungsvorschlägen und Durchführung dieser am Windkanal,
- Wiederholtes Vermessen des Geschwindigkeitsprofils und Vergleich mit dem Ursprungszustand,
- Messen mit unterschiedlichen Anemometern bei Variation des Turbulenzgrades und Auswertung der Messergebnisse,
- Anfertigung einer Präsentation und Kurzdokumentation der Diplomarbeit zur Veröffentlichung im Internet.

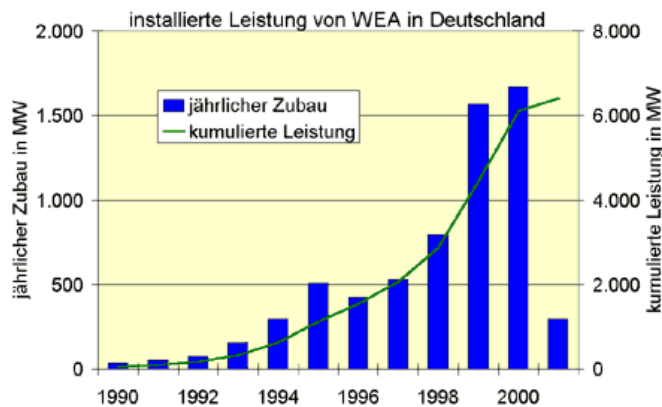


<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>1   METHODEN DER WINDGESCHWINDIGKEITSMESSUNG.....</b>	<b>3</b>
1.1   SCHALENKREUZANEMOMETER .....	3
1.2   AKUSTISCHE STRÖMUNGSMESSUNG .....	5
1.2.1   Ultraschallanemometer .....	6
<b>2   PROBLEMATIK DER WINDGESCHWINDIGKEITSMESSUNG .....</b>	<b>10</b>
2.1   DER WIND IN BODENNÄHE.....	10
2.2   SCHWANKUNG DER MITTLEREN GESCHWINDIGKEIT TURBULENZDEFINITION .....	10
2.2.1   Berechnung des Turbulenzgrades .....	11
<b>3   KALIBRIERUNG DER ANEMOMETER.....</b>	<b>14</b>
3.1   DIE LEISTUNGSKURVE EINER WINDENERGIEANLAGE .....	15
3.2   VORGEHENSWEISE DER KALIBRIERUNG .....	16
3.3   EINFLUSS DER POSITION DES PRANDTLSCHEM STAUROHRES AUF DIE KALIBRIERUNG .....	18
3.4   NORMALANSTRÖMUNG UND SCHRÄGANSTRÖMUNG.....	19
3.4.1   Normalanströmung .....	20
3.4.2   Schräganströmung .....	20
3.4.3   Einfluss der Schrägstellung des Anemometers auf die Messergebnisse.....	21
3.4.4   Nachlaufverhalten der Anemometer .....	23
3.5   VARIATION DER TURBULENZ.....	24
3.6   BESCHREIBUNG DER ANEMOMETER UND GRAFISCHE DARSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE .....	25
3.6.1   Anemometer der Firma Adolf Thies GmbH & Co. KG .....	25
3.6.2   Anemometer der Firma Theodor Friedrichs & Co. ....	28
3.6.3   Anemometer der Firma R. M. Young Company.....	30
3.6.4   Anemometer der Firma Met One Instruments .....	31
3.6.5   Anemometer der Firma Vector Instruments .....	32
3.6.6   Anemometer der Firma Conrad Electronics GmbH.....	34
3.6.7   Anemometer der Firma METEK GmbH.....	35
3.7   ERGEBNISSE DER KALIBRIERUNG .....	36
3.8   ABWEICHUNG DER KALIBRIERKURVE BEI TURBULENTER ANSTRÖMUNG .....	38
3.8.1   Strömungswiderstand einer umströmten Kugel .....	38
3.8.2   Reynoldszahlen einer umströmten Kugel.....	40
3.8.3   Fazit .....	40
<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>42</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>43</b>
<b>ANHANG.....</b>	<b>45</b>

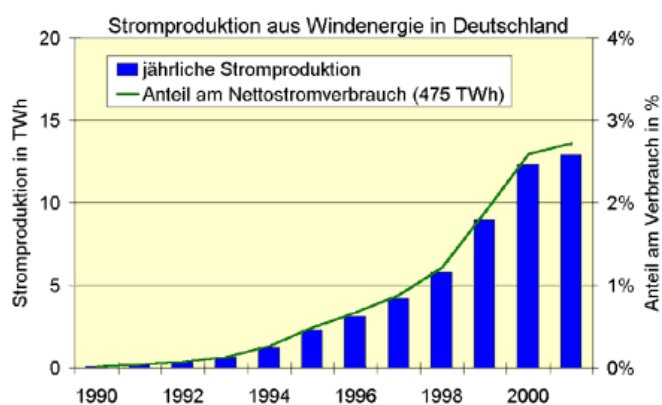


## Einleitung

Die Nutzung erneuerbarer Energien<sup>1</sup> nimmt seit einiger Zeit immer mehr an Bedeutung zu. Ein Beispiel dafür ist die Windenergie. Firmen wie ENERCON, VESTAS, NORDEX, ENRON WIND, DE WIND usw. haben sich auf die Konvertierung<sup>2</sup> der Windenergie in elektrische Energie spezialisiert. In Deutschland existieren zur Zeit ca. 9370 Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von knapp 6100 MW. Demnach werden ca. 2,5 Prozent des gesamten Energiebedarfs Deutschlands durch die Windenergieanlagen gedeckt (**Bild 0.1**). In den letzten 10 Jahren ist die durchschnittliche Leistung einer Windenergieanlage fast um das 10-fache auf ca. 1,1 MW gestiegen (Stand 12/2000) [4].



a)



b)

**Bild 0.1 a)** Leistungszuwachs pro Jahr und installierte Gesamtleistung der WEA  
**b)** Gesamtstromproduktion pro Jahr und prozentualer Anteil der Windenergie [4]

Um eine möglichst kurze finanzielle Amortisationszeit für Windenergieanlagen (WEA) realisieren zu können, ist die Wahl des Standortes und die Leistungskurve einer Anlage von größter Bedeutung. Hierzu werden sogenannte „Standortgutachten“ und Leistungskurvenvermessungen von verschiedenen Firmen wie zum Beispiel der Firma WINDTEST Grevenbroich GmbH erstellt. Zur Erstellung dieser Gutachten wird eine möglichst genaue Bestimmung der Windgeschwindigkeit benötigt. Die Messung der Windgeschwindigkeit erfolgt üblicherweise mit sogenannten Schalenkreuzanemometern. Aber auch andere Anemometer, wie zum Beispiel Ultraschallanemometer, werden seit kurzem zur Geschwindigkeitsmessung des Windes benutzt.

<sup>1</sup> Energiequellen, die ohne Einsatz fossiler Rohstoffe erschlossen und zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gefördert werden

<sup>2</sup> Umwandlung



Bekannt ist, dass verschiedene Anemometer unterschiedlich auf die Turbulenz der Strömung und auf Schräganströmung reagieren. Bei Schalenkreuzanemometer mit Kugelhalbschale oder kegeliger Halbschale soll der Unterschied sogar dazu geführt haben, dass sich die Leistungskurve von deutschen Windenergieanlagen (Messung mit Kugelhalbschale) und dänischen Windenergieanlagen (Messung mit Kegelhalbschale) unterscheiden.

Aufgabe der vorliegenden Untersuchung war es, den Einfluss der unterschiedlichen Anströmbedingungen bei der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit mit unterschiedlichen Anemometern zu untersuchen. Das Ziel war es, eine Beurteilung über die Messgenauigkeit verschiedener Anemometertypen bei einer turbulenten und einer schrägen Anströmung zu erhalten.

In dieser Diplomarbeit wurden unterschiedliche Anemometer der Hersteller THIES CLIMA, MET ONE, YOUNG, FRIEDRICHS, VEKTOR, METEK und GILL im Windkanal kalibriert. Dabei wurden die Anemometer bei einer turbulenten und schrägen Anströmung miteinander verglichen. Die Kalibrierung der Anemometer bei unterschiedlichen Bedingungen erfolgte im Windkanal des Institutes für Strömungsmaschinen der Fachhochschule Düsseldorf, der im Rahmen dieser Diplomarbeit zunächst hinsichtlich der Eignung für solche Zwecke untersucht wurde. Dazu wurde die Geschwindigkeitsverteilung und der Turbulenzgrad dieses Windkanals bestimmt.

Die Diplomarbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Firma WINDTEST Grevenbroich GmbH durchgeführt. Die Firma WINDTEST hat sich auf die Prüfung und Vermessung unterschiedlicher Windenergieanlagen spezialisiert. Sie lieferte freundlicherweise einen großen Teil der untersuchten Anemometer. Auch die Firma ENRON, sowie das Fachgebiet Umwelttechnik der FH Düsseldorf und die Universität Bielefeld stellten einige Anemometer für diese Untersuchungen zur Verfügung.



# 1 Methoden der Windgeschwindigkeitsmessung

## 1.1 Schalenkreuzanemometer

Strömungen oder Geschwindigkeiten werden mit sogenannten Anemometern gemessen. Das Wort Anemometer setzt sich zusammen aus den beiden griechischen Begriffen „anemon“ (Wind) und „metron“ (Messgerät) und ist eine allgemeine Bezeichnung für alle Arten von Windmessgeräten.

Die Messung der Windgeschwindigkeit in der Meteorologie erfolgt normalerweise mit Hilfe eines Schalenkreuzanemometers (auch Widerstandsläufer genannt). Das Anemometer hat eine senkrechte Achse und drei oder vier Schalen, die den Wind aufnehmen. Teilweise ist das Anemometer mit einer Windfahne zur Detektion der Windrichtung ausgerüstet (**Bild 1.1a**). In der Verfahrenstechnik werden häufig Flügelradanemometer verwendet (**Bild 1.1b**). Sie funktionieren nach einem ähnlichen Prinzip wie die Schalenkreuzanemometer, haben aber Flügel.



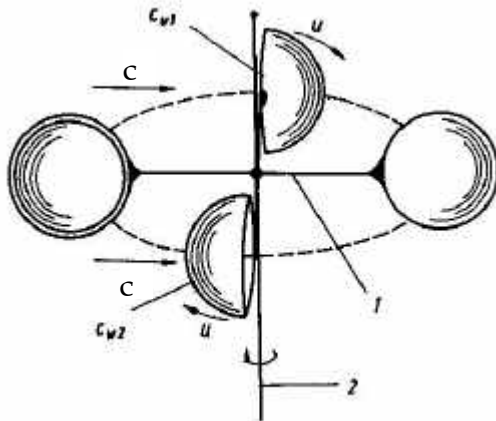
**Bild 1.1a** Schalenkreuzanemometer und Windfahne [8]



**Bild 1.1b** Flügelradanemometer [9]

### Messprinzip

Im **Bild 1.2** ist ein Schalenkreuzanemometer schematisch dargestellt. Die Halbkugeln drehen sich im Luftstrom mit der Umfangsgeschwindigkeit  $u$  um die senkrechte Achse.



**Bild 1.2** Schalenkreuzanemometer schematisch [6]

**1** Kreuzstange mit Halbkugelschalen; **2** Achse;  $c_w$  Widerstandsbeiwert<sup>3</sup>;  $u$  Umfangsgeschwindigkeit;  $c$  Strömungsgeschwindigkeit

Der Antrieb erklärt sich aus den unterschiedlichen Widerstandsbeiwerten  $c_w$  der Halbkugelschalen. Die konvexe<sup>4</sup> Seite der Schale hat einen geringeren  $c_w$ -Wert, als die konkave<sup>5</sup> Seite. Die Schale mit der konkaven Seite wird daher vom Wind wegbewegt. Mit der Drehung der Schalen ändert sich sowohl der  $c_w$ -Wert als auch die Fläche  $A$  der Einzelschalen. Die vom Fluid mit der Dichte  $\rho_F$  ausgeübte dynamische Kraft  $F_F$  entspricht der Gleichung **(1.1)**.

$$F_F = \frac{c_w \cdot A \cdot \rho_F \cdot c^2}{2} \quad \text{(1.1)}$$

Für die Messung der Geschwindigkeit wird meistens die Anzahl der Schalenumdrehungen pro Sekunde (**Frequenz**) gemessen. Zwischen der Geschwindigkeit und der Messgröße besteht ein linearer Zusammenhang, der durch eine Kalibrierung ermittelt wird. Der Widerstandsbeiwert  $c_w$  ist von der Reynolds-Zahl abhängig. Deshalb ist bei einem größeren Geschwindigkeitsbereich eine individuelle Kalibrierung erforderlich [2].

### **Problematik der Messung mit Schalenkreuzanemometer**

Das Anemometer läuft schon bei einem Windstoß von ca. 0,3 m/s an, aber flaut der Wind abrupt ab, läuft es wegen der Trägheit noch eine Zeit nach. Die Geschwindigkeit wird also noch für einige Sekunden gemessen, obwohl kein Wind mehr weht. Somit wird der berechnete Mittelwert nach oben hin verfälscht.

<sup>3</sup>  $c_w$ -Wert: auch Widerstandsbeiwert genannt. Setzt sich zusammen aus Form- und Reibungswiderstand.

<sup>4</sup> nach außen gewölbt, erhaben

<sup>5</sup> hohl, nach innen gekrümmt



Andererseits weist das Gerät zwar eine geringe Haftreibung auf, aber bei einer sehr niedrigen Windgeschwindigkeit (kleiner 0,3 m/s) läuft es nicht an, so dass auch hier ein Messfehler zustande kommt. Um dem entgegenzuwirken, wählt man eine möglichst kurze Armlänge und beschränkt sich auch häufig auf nur drei Schalen, so dass das Trägheitsmoment auf diese Weise verringert wird. Um andererseits die Anlaufgeschwindigkeit klein zu halten, wählt man den Schalendurchmesser möglichst groß [10].

### **Vor- und Nachteile der Schalenkreuzanemometer**

#### **Vorteile**

- robuster Windgeschwindigkeitsmesser,
- wartungsarm, hohe Lebensdauer von ca. 20 Jahren (Lageraustausch je nach Einsatz alle 3 bis 6 Jahre) [8],
- richtungsunempfindlich in der Ebene des Schalenkreuzes.

#### **Nachteile**

- reibungsabhängige Anlaufgeschwindigkeit,
- größere Linearitätsabweichung, wegen der Reynoldsabhängigkeit des Widerstandsbeiwertes  $c_w$ ,
- mäßige Genauigkeit von ca. 1 %, [14]
- kurze Kalibrierintervalle von 2 bis 3 Jahren.

### **Anwendungsgebiete der Schalenkreuzanemometer**

Schalenkreuzanemometer werden vorwiegend in der Meteorologie zur Windgeschwindigkeitsmessung eingesetzt. In der Windenergiebranche zählen kalibrierte Schalenkreuzanemometer mit Windfahnen zum Standard. Sie werden auf den Windenergieanlagen oder auf hohen Windmessmasten zur Ermittlung der Windgeschwindigkeit in der Nabenhöhe der Windenergieanlage installiert.

Flügelradanemometer werden in der Verfahrenstechnik hauptsächlich dort eingesetzt, wo die Anströmrichtung bekannt ist, z. B. als Wasserzähler in Rohrleitungen.

## **1.2 Akustische Strömungsmessung**

Akustische Strömungsmessverfahren benutzen Schallwellen zur Geschwindigkeits- und Durchflussmessung. Messgrößen für die Bewegung eines Fluids sind Frequenzänderungen, Laufzeitdifferenzen oder Phasenverschiebung der Schallwellen. Sie werden kontinuierlich oder impulsförmig eingestrahlt. Da sich die Auflösung mit der Schallfrequenz erhöht, arbeiten die akustischen Strömungsmesser mit Ultraschall<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Ultraschall: unhörbare Schallwellen sehr hoher Frequenz (größer als 20 000 Hz)



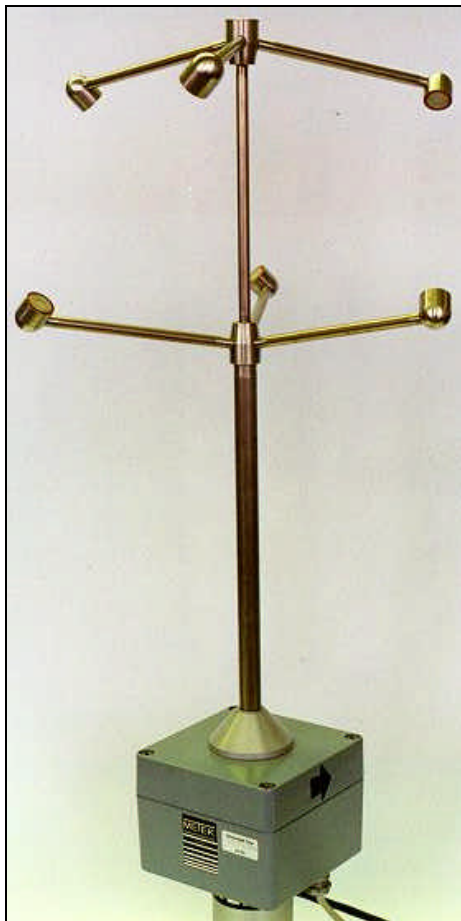


Die Mikroelektronik hat die Entwicklung von akustischen Strömungsmessern wesentlich unterstützt. Das betrifft sowohl die Signalerzeugung als auch deren Empfang, Wandlung, Verarbeitung und Speicherung. So gibt es heute eine Vielzahl technischer Lösungen, die mit hohen Abstraten arbeiten, Parameterdriftungen gut kompensieren, den Messort einstellbar machen oder auch eine schnelle zeitliche und räumliche Mittelung der Geschwindigkeit gewährleisten [2].

### 1.2.1 Ultraschallanemometer

Ultraschallanemometer gehören zu einer neuen Generation von Windsensoren. Sie erfassen Luftströmungen in ein, zwei oder drei Dimensionen mit einer hohen Datenqualität [11].

#### Messprinzip



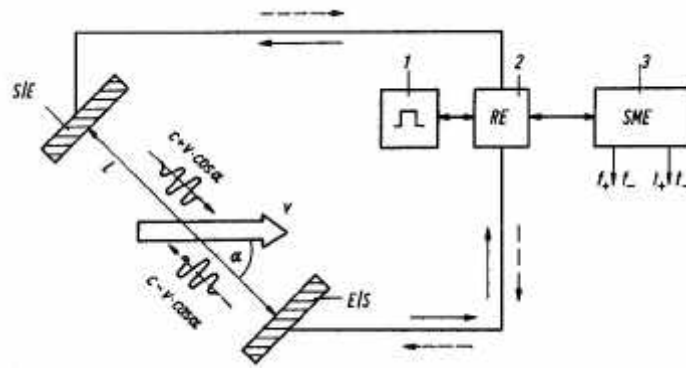
**Bild 1.3** Ultraschallanemometer [13]  
(Sonic Anemometer-Thermometer)

Zu dem physikalischen Grundprinzip gehört der Mitführungseffekt. Mit der Schallgeschwindigkeit in ruhender Luft  $a$  überlagert sich die Geschwindigkeitskomponente einer Luftbewegung in Windrichtung  $c$ . So gilt in Strömungsrichtung  $a+c$  und gegen die Strömungsrichtung  $a-c$ . Auch die Richtung des Schallstrahles ändert sich mit der Richtung der Luftbewegung [2]. Die aus der Überlagerung resultierende Ausbreitungsgeschwindigkeit führt zu unterschiedlichen Laufzeiten des Schalles bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Richtungen über eine feststehende Messstrecke.

In Rahmen der Diplomarbeit wurden auch Untersuchungen mit einem Sonic Anemometer-Thermometer (eine Kombination aus Geschwindigkeits- und Temperaturmessgerät) durchgeführt (**Bild 1.3**).

Dieser Anemometer arbeitet nach dem Laufzeitdifferenzverfahren.

Zwei sich gegenüberliegende Transducer (Sensoren, welche ein Signal sowohl senden als auch empfangen können) senden einander abwechselnd einen Impulszug im Ultraschallbereich mit einer Frequenz von ca. 180 kHz zu (**Bild 1.4**).



**Bild 1.4** Impulslaufzeit - Messstrecke (Transite Time) mit Umlaufstreuung (Sing-around-Kreis) [2]

**S/E, E/S** Sende-Empfangsschwinger; **1** Impulsgenerator; **2** Rückführelektronik (RE): Verstärker für Impulslauf und Richtungsumschalter; **3** Steuer- und Messelektronik für Laufzeiten  $t_+$  und  $t_-$  und Umlauffrequenzen  $f_+$  und  $f_-$ .

Da die Distanz  $L$  zwischen den beiden Transducern und der Neigungswinkel  $\alpha$  bekannt ist, kann aus den beiden gemessenen Laufzeiten  $t_+$  und  $t_-$  die Geschwindigkeit  $c$  der bewegten Luft in der Achse des Transducerpaares gemäß Gleichungen (1.2) bestimmt werden.

$$t_+ = \frac{L}{a + c \cdot \cos \alpha} \qquad t_- = \frac{L}{a - c \cdot \cos \alpha} \qquad (1.2)$$

Aus den Gleichungen (1.2) lässt sich die Differenz  $\Delta t$  und die Summe  $\Sigma t$  der Laufzeiten bestimmen [12]:

$$\Delta t = t_- - t_+ = \frac{2 \cdot L \cdot c \cdot \cos \alpha}{a^2 - c^2 \cdot \cos^2 \alpha} \qquad \Sigma t = t_- + t_+ = \frac{2 \cdot L}{a^2 - c^2 \cdot \cos^2 \alpha} \qquad (1.3)$$

unter der Annahme, dass  $a \gg c$  ist, gilt [2]:

$$\Delta t = t_- - t_+ \approx \frac{2 \cdot L \cdot c \cdot \cos \alpha}{a^2} \qquad \Sigma t = t_- + t_+ \approx \frac{2 \cdot L}{a^2} \qquad (1.4)$$

Die Gleichungen (1.5) lassen sich so auflösen, dass die Schallgeschwindigkeit  $a$  und die Windgeschwindigkeit  $c$  zu ermitteln ist [12]:

$$a = \frac{L \cdot (1/t_+ + 1/t_-)}{2 \cdot \cos \alpha} \qquad c = \frac{L \cdot (1/t_+ - 1/t_-)}{2 \cdot \cos \alpha} \qquad (1.5)$$



Wesentliches Element ist der schnelle elektronische Dividierer, der nach jeder Zeitmessung von Hin- und Rücklauf des Ultraschallimpulses sofort die Reziprokwerte  $1/t_+$  und  $1/t_-$  bildet [2].

Durch die Verwendung von mehreren Transducerpaaren können die einzelnen Komponenten einer Ebene bzw. eines Raumes ermittelt und in Betrag und Richtung der Luftströmung umgerechnet werden. Nach Messung der rechtwinkligen Geschwindigkeitskomponenten, werden diese anschließend durch den Mikroprozessor des Anemometers in Polarkoordinaten transformiert und als Betrag und Winkel der Windgeschwindigkeit ausgegeben.

Die Berechnung des Turbulenzgrades erfolgt aus der Standardabweichung  $s$  der Messwerte:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} \quad Tu = \frac{\sigma}{\bar{c}} \quad (1.6)$$

Die Sonic-Anemometer (z. B. das Modell USA-1 der Firma METEK) können neben der Strömungsgeschwindigkeit auch virtuell die Temperatur messen. Die Virtuelltemperatur ist die Temperatur von trockener Luft, die unter demselben Druck dieselbe Dichte hat, wie die Luft mit der aktuellen Feuchtigkeit.

Die Schallgeschwindigkeit  $a$  in der trockenen Luft ist von der Lufttemperatur  $T$  wie folgt abhängig ( $k$  Isentropenexponent):

$$a = \sqrt{k \cdot R \cdot T} \quad (1.7)$$

Für die Berechnung der Schallgeschwindigkeit in der feuchten Luft wird die Gleichung (1.7) mit dem Faktor  $K$  erweitert. Dieser Faktor ist schwach von der Feuchte und chemischen Zusammensetzung der Luft abhängig. Es gilt also:

$$a = \sqrt{k \cdot R \cdot T \cdot K} \quad (1.8)$$

Dieser Zusammenhang kann mit der folgenden Zahlenwertgleichung angenähert werden:

$$T = \left( \frac{a}{20,05} \right)^2 \quad (1.9)$$

wobei  $T$  die Virtuelltemperatur in K und  $a$  die Schallgeschwindigkeit in m/s ist [5].



### **Vor- und Nachteile der akustischen Strömungsmessung**

Ultraschallanemometer kommen ohne bewegte Teile aus. Die Anlaufschwellen und Trägheitsfehler sind daher nicht vorhanden. Durch den Wegfall von Verschleißteilen sind periodische Wartungsintervalle nicht erforderlich. Die Signalqualität bleibt über die gesamte Lebensdauer erhalten, da Lagerreibung und Verschmutzung, im Gegensatz zu den Halbschalenanemometern, keine Rolle spielen **[11]**.

#### **Vorteile**

- Keine bewegten Teile, geringer Verschleiß,
- großer Messbereich bei hoher Auflösung,
- die Messergebnisse sind unabhängig von Temperatur, Dichte und Druck,
- vektorielle Geschwindigkeitsmessung mit drei Komponenten möglich,
- korrosionsbeständig, hohe Lebensdauer und Zuverlässigkeit.
- Kurze Messzeiten möglich (1 bis 10  $\mu$ s je Messwert), d. h. schnelle Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit nach Richtung und Betrag messbar,
- gleichzeitig Temperatur- und Schallgeschwindigkeitsmessung.

#### **Nachteile**

- Hoher Preis gegenüber mechanischen Wandlern.
- Relativ hoher Aufwand für Genauigkeiten von  $\pm 1\%$  vom Messwert **[2]**.

### **Anwendungsgebiete der akustischen Strömungsmessung**

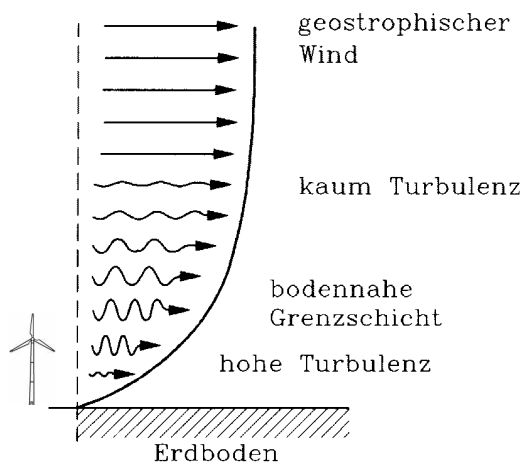
Akustische Strömungsmesser sind zuverlässige Messmittel in der Meteorologie und werden vorzugsweise zur Untersuchung atmosphärischer Turbulenzen eingesetzt. Ultraschallanemometer werden zur Strömungs- und Durchflussmessung in Flüssigkeiten (climb-on Verfahren) und Gasen eingesetzt. Sie sind in allen Bereichen zu finden, in denen es entweder auf eine besonders hohe Datenqualität ankommt oder in denen die langfristige Zuverlässigkeit und Wartungsfreiheit der Messsysteme von Bedeutung ist **[11]**.



## 2 Problematik der Windgeschwindigkeitsmessung

### 2.1 Der Wind in Bodennähe

Bei Strömung der Luftmassen über die raue Erdoberfläche wird die Strömungsgeschwindigkeit abgebremst und es entsteht eine bodennahe Grenzschicht mit einer charakteristischen vertikalen Verteilung der Windgeschwindigkeit von null bis zu der des geostrophischen<sup>7</sup> Windes (**Bild 2.1**).



Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft wird direkt am Boden bis auf Null abgebremst. Zwischen den ungestörten Luftschichten des geostrophischen Windes und dem Boden existiert demzufolge eine Schicht starker Variation der Windgeschwindigkeiten **[3]**. Der Wind, der in Bodennähe auftritt und von Windenergieanlagen genutzt wird, ist relativ turbulent.

**Bild 2.1** Bodennahe Grenzschicht **[3]**

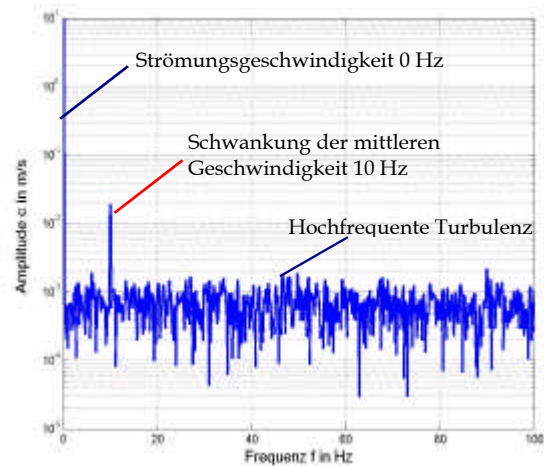
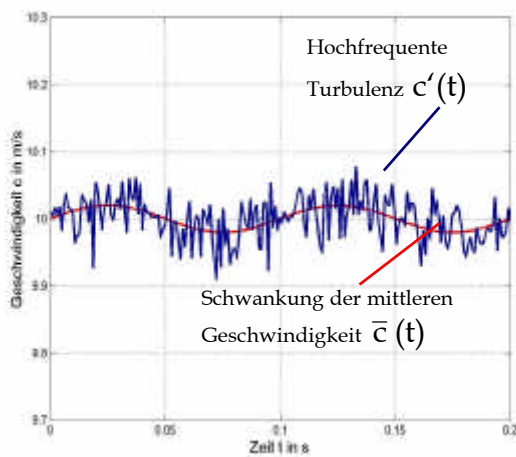
Die Windenergieanlagen arbeiten immer in dieser turbulenten Grenzschicht. Deshalb ist es wichtig, dass die Anemometer die Geschwindigkeit einer turbulenten Strömung richtig messen.

Über dem Meer ist die Bodenrauigkeit geringer. Hier kommt es in geringen Höhen zu einer relativ schnellen Zunahme der Windgeschwindigkeit. Deshalb werden neuerdings viele Windenergieanlagen auf dem Meer (Offshore) gebaut.

### 2.2 Schwankung der mittleren Geschwindigkeit Turbulenzdefinition

Die turbulente Strömung ist durch unregelmäßige zeitliche und räumliche Schwankungen der Geschwindigkeit gekennzeichnet. In der Regel ist sie einer Hauptströmung überlagert. Die Geschwindigkeit  $\mathbf{c}$  setzt sich aus der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{\mathbf{c}}$  und deren Schwankung  $\mathbf{c}'$  zusammen:  $\mathbf{c} = \bar{\mathbf{c}} + \mathbf{c}'$  **[1]**. Schwankt auch die Komponente  $\bar{\mathbf{c}}$  so spricht man von der Schwankung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. **Bilder 2.2a** und **b** zeigen eine mit MATLAB simulierte turbulente Strömung (Sinussignal überlagert mit Rauschen).

<sup>7</sup> Geostrophisch: der Wind, der noch keine Störung durch die Struktur der Erdoberfläche erfahren hat



a) Zeitsignal

b) ungemittelttes Frequenzspektrum

**Bild 2.2** Beispiel einer turbulenten Strömung

Den Unterschied zwischen der Turbulenz (im **Bild 2.2a** blau dargestellt) und der Schwankung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (im **Bild 2.2a** rot dargestellt) kann man mit den Begriffen „Mikro“ und „Makro“ erklären. Die Turbulenz ist hochfrequent, das heißt im Zeitbereich betrachtet sind es Mikro-Schwankungen und die Schwankung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit ist niederfrequent - also eine Schwankung in einem größeren oder „Makro“ Zeitbereich. Wie aus dem **Bild 2.2** ersichtlich, ist die Turbulenz von einer höheren Frequenz, als die Schwankung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.

In der Fachliteratur findet man leider wenige Aussagen, in welchen Frequenzbereichen die Turbulenz und die Schwankung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit definiert ist. Für die Ermittlung der Anströmgeschwindigkeit der Windenergieanlage werden üblicherweise 10-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit verwendet. Damit kann keine Angabe zu dem Turbulenzgrad erfolgen, weil die hochfrequenten Geschwindigkeitsschwankungen nicht erfasst werden. In der Meteorologie werden die niederfrequenten Schwankungen oft als Turbulenz bezeichnet. Deshalb sollte man bei jeder Turbulenzmessung den verwendeten Frequenzbereich der Geschwindigkeitsschwankung mit angeben.

### 2.2.1 Berechnung des Turbulenzgrades

Den zeitlichen Mittelwert jeder Geschwindigkeitskomponente kann man wie folgt bestimmen [7]:

$$\bar{c}_x = \frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} c_x dt \quad \bar{c}_y = \frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} c_y dt \quad \bar{c}_z = \frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} c_z dt \quad (2.1)$$



Der **Betrag der mittleren Geschwindigkeit**  $\bar{c}$  in einer dreidimensionalen Strömung ist:

$$\bar{c} = \sqrt{(\bar{c}_x^2 + \bar{c}_y^2 + \bar{c}_z^2)} \quad (2.2)$$

Die Geschwindigkeitsschwankungen können positiv und negativ sein. Deshalb würden deren zeitliche Mittelwerte nach der Gleichung (2.1) gegen null streben. Quadriert man diese Werte, so erhält man den dagegen einen von null abweichenden Betrag. Mit der Gleichung (2.3) ermittelt man die mittleren Geschwindigkeitsschwankungen jeder einzelnen Komponente [7]:

$$\bar{c}_x'^2 = \frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} c_x'^2 dt \quad \bar{c}_y'^2 = \frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} c_y'^2 dt \quad \bar{c}_z'^2 = \frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} c_z'^2 dt \quad (2.3)$$

Der **Betrag der mittleren Geschwindigkeitsschwankung**  $|\bar{c}'|$  lässt sich aus dem arithmetischen Mittelwert der zeitlich gemittelten Quadrate der Geschwindigkeitsschwankungen einzelner Komponenten berechnen:

$$|\bar{c}'| = \sqrt{\frac{(\bar{c}_x'^2 + \bar{c}_y'^2 + \bar{c}_z'^2)}{3}} \quad (2.4)$$

Das Verhältniss der beiden Beträge ist der **Turbulenzgrad Tu**: ein Maß für die relative Größe der Geschwindigkeitsschwankungen in einer Strömung (Gleichung (2.5)).

$$Tu = \frac{|\bar{c}'|}{\bar{c}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{\bar{c}_x'^2 + \bar{c}_y'^2 + \bar{c}_z'^2}{\bar{c}_x^2 + \bar{c}_y^2 + \bar{c}_z^2}} \quad (2.5)$$

Bei einer isotropen<sup>8</sup> Strömung sind die Geschwindigkeitsschwankungen in x, y und z Richtung identisch:  $\bar{c}_x'^2 = \bar{c}_y'^2 = \bar{c}_z'^2 = \bar{c}'^2$ . In diesem Fall spricht man von der isotropen Turbulenz [1]:

---

<sup>8</sup> Isotrop: Bezeichnung für Stoffe, die in jeder Richtung die gleichen physikalischen Eigenschaften aufweisen



$$Tu_{\text{isotrop}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{3 \cdot \overline{c'^2}}{\overline{c_x^2} + \overline{c_y^2} + \overline{c_z^2}}} = \frac{\sqrt{\overline{c'^2}}}{\overline{c}} \quad (2.6)$$

Die Schwankungsgröße  $\mathbf{c}'$  kann gemessen werden. Die Voraussetzung dafür ist, dass die Messmittel eine hohe zeitliche Auflösung haben, um den schnellen Fluktuationen der Strömung folgen zu können [2]. Dafür eignen sich zum Beispiel Hitzdraht-, Heißfilm-, Ultraschallanemometer und das Sodar. Auch mit Hilfe von Frequenzanalysatoren kann man die Schwankungsgröße  $\mathbf{c}'$  durch eine FFT<sup>9</sup>-Analyse des Zeitsignals ermitteln.

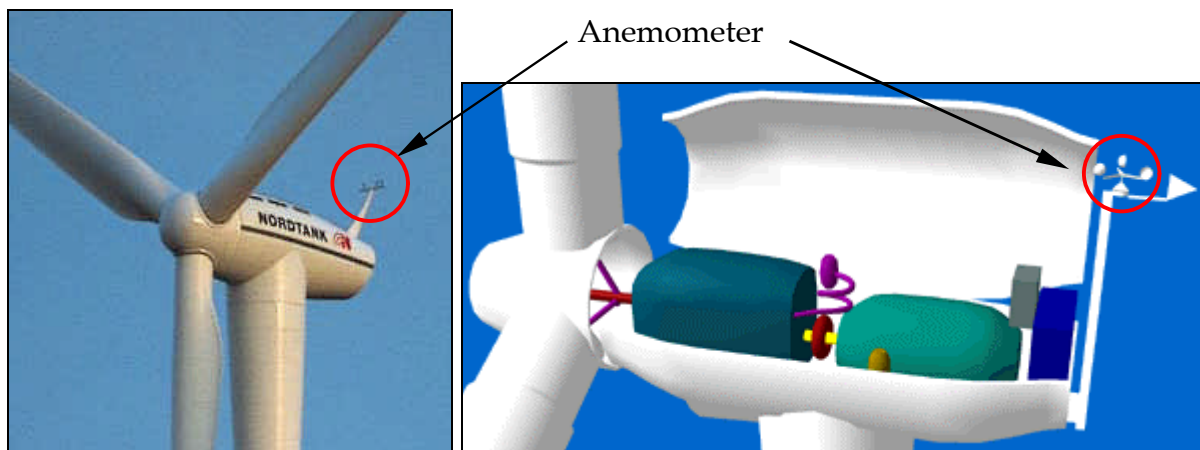
---

<sup>9</sup> Fast Fourier Transformation (siehe Kapitel 2)



### 3 Kalibrierung der Anemometer

Um korrekte und reproduzierbare Messwerte mit Halbschalenanemometern erzielen zu können, sollten diese gemäß den Herstellerangaben möglichst ungehindert und frei angeströmt werden. Diese Bedingungen werden allerdings oftmals nicht erfüllt. So wird zum Beispiel bei Windenergieanlagen (WEA) die Windgeschwindigkeit mit Hilfe von Halbschalenanemometern auf der Gondel hinter den Rotorblättern erfasst (**Bild 3.1**).

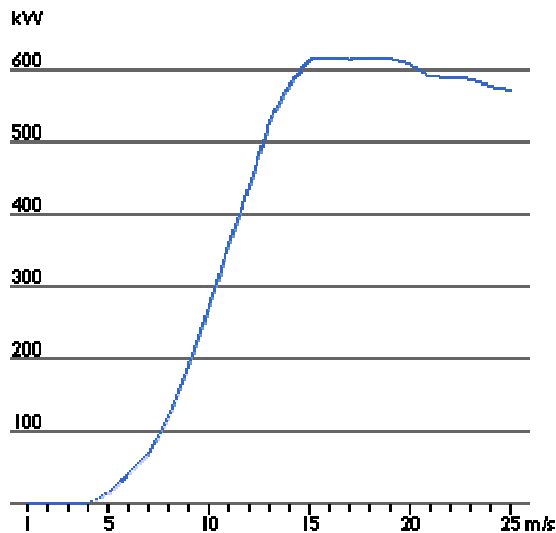


**Bild 3.1** Positionierung der Anemometer auf Windenergieanlagen [14]

Die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe wird laut dem Verband der dänischen Windkraftindustrie [14] nur dazu verwendet, um festzustellen, ob genügend Wind zur Verfügung steht. In diesem Fall wird der Rotor in den Wind gedreht und gestartet. Auf der Gondel ist mit einer stark turbulenten Strömung zu rechnen, da der Blattfuß einen Durchmesser von mehreren Metern besitzt und bei Betrieb ständig vor dem Anemometer vorbeiläuft. Idealerweise müssten die Anemometer in ausreichendem Abstand vor den Rotorblättern angeordnet werden, zum Beispiel auf einem Windmessmast in Hauptwindrichtung. Dies ist aber in der Praxis nicht üblich, da die Errichtung eines Windmessmastes hohe Kosten verursacht. Zur Aufnahme einer sogenannten Leistungskurve werden diese Kosten aber in Kauf genommen, weil eine genaue Bestimmung der Windgeschwindigkeit für diese Zwecke unumgänglich ist. Zum An- oder Abschalten der WEA ist die Datenqualität des Anemometers auf der Gondel aber durchaus ausreichend.

### 3.1 Die Leistungskurve einer Windenergieanlage

Die Leistungskurve einer Windenergieanlage gibt an, wie hoch die abgegebene elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit ist. In **Bild 3.2** ist die Leistungskurve einer stallgeregelten Anlage mit 600 kW Leistung dargestellt.



**Bild 3.2** Leistungskurve einer stallgeregelten WEA [14]

Leistungskurven werden mittels Feldmessungen ermittelt, wobei ein Anemometer auf einem Mast mit einem definierten Abstand in der Nähe der Windenergieanlage angebracht wird. Die Windgeschwindigkeit und die abgegebene elektrische Leistung der Anlage liegen als 10-Minuten-Mittelwerte vor. Wenn man alle Wertepaare in das Diagramm einträgt, erhält man eine Leistungskurve mit einer bestimmten Streuung. Die resultierende Leistungskurve wird dann meistens aus einer Mittelwertbildung über 0,25 m/s Windbins bestimmt.

Das bedeutet, dass die Windgeschwindigkeitsachse in konstante Abschnitte (hier 0,25 m/s) unterteilt wird und alle sich darin befindlichen Messpunkte gemittelt werden. Die im **Bild 3.2** dargestellte Kurve ist interpoliert aus einer Schar von Messwerten, die mehr oder weniger von der interpolierten Leistungskurve abweichen. Der Grund dafür liegt darin, dass die Windgeschwindigkeit in der Praxis ständig schwankt und deshalb die Anströmgeschwindigkeit des Rotors nur als zeitlicher Mittelwert mit einer gewissen Toleranz bestimmt werden kann. Die Messung der Windgeschwindigkeit ist fehlerbehaftet. Bei einem Messfehler von 3 Prozent wird die Energie des Windes um 9 Prozent höher oder niedriger bestimmt (der Energiegehalt steigt mit der zweiten Potenz der Windgeschwindigkeit). Das bedeutet, dass selbst zertifizierte Leistungskurven Fehler von  $\pm 10$  Prozent aufweisen können [14].

### 3.2 Vorgehensweise der Kalibrierung

Um den Einfluss der verschiedenen Strömungseigenschaften auf die unterschiedlichen Bauarten der Anemometer feststellen zu können, wurde jedes einzelne Anemometer nach einer festgelegten Prozedur untersucht. Eine senkrechte Einbauweise des Anemometers in der Mitte des Windkanals wurde als Referenz<sup>10</sup> gewählt und der Einfluss einer 10 Grad Schräganströmung sowie einer turbulenten Anströmung wurden untersucht. Mit Hilfe der erzielten Messergebnisse wurden die einzelnen Abweichungen bei verschiedenen Anströmbedingungen bewertet. Der Geschwindigkeitsbereich für diese Kalibrierung wurde auf 4 - 16 m/s festgelegt. Dies ist ein üblicher Messbereich für die Kalibrierung solcher Anemometer.

Die Ausgangssignale der Anemometer wurden in einer Tabelle eingetragen und in ein Kalibrierprotokoll übertragen. Dieses Kalibrierprotokoll wurde auf Wunsch der Firma WINDTEST Grevenbroich einem Kalibrierprotokoll des „Institutes für Schiffbau (Universität Hamburg)“ nachempfunden. In dem Protokoll sind im Wesentlichen eine Kalibrierkurve mit den direkten Messwerten und den entsprechenden Abweichungen zu der Kalibriergeraden, eine Standardabweichung und ein Korrelationskoeffizient<sup>11</sup> aufgeführt. Weiterhin enthält das Protokoll zusätzliche Angaben, wie zum Beispiel die Gleichung der Kalibriergeraden, Umgebungstemperatur, Luftdruck, Luftfeuchte usw. Für jedes Anemometer wurden mindestens drei solcher Protokolle angefertigt bei:

- einer Normalanströmung als Referenz dienend,
- einer Schräganströmung,
- und einer turbulenten Anströmung.

Exemplarisch ist eines dieser Kalibrierprotokolle in **Bild 3.3** dargestellt. Die weiteren angefertigten Protokolle befinden sich im Anhang.

---

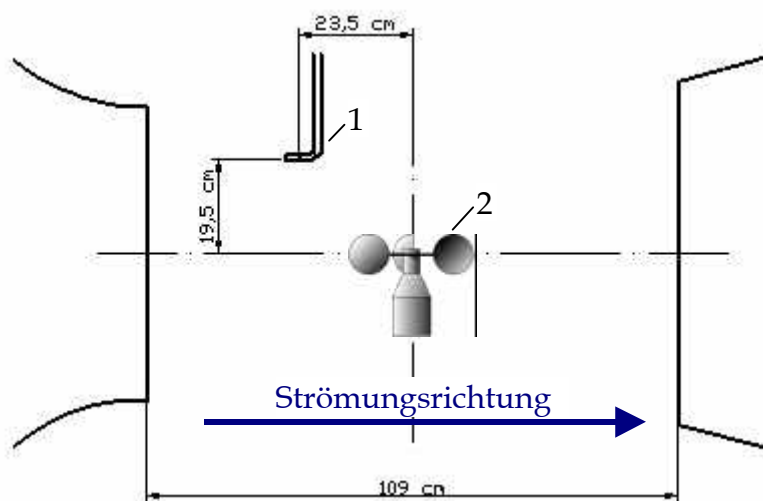
<sup>10</sup> Vergleichswert

<sup>11</sup> Korrelation: statistisch ermittelte Abhängigkeit zweier variabler Größen voneinander; Wechselbeziehung



### 3.3 Einfluss der Position des Prandtlschen Staurohres auf die Kalibrierung

Als Referenzmessgerät für die Kalibrierung der Anemometer wurde aufgrund der einfachen Handhabung und ausreichender Genauigkeit ein Prandtlsches Staurohr verwendet. Dieses Gerät wird häufig zur Strömungsgeschwindigkeitsbestimmung in Windkanälen eingesetzt. Die Kalibrierung der Anemometer erfolgte in der Mitte vom Windkanal. Das Prandtlsche Staurohr befand sich links oberhalb des zu kalibrierenden Anemometers (**Bild 3.4**).

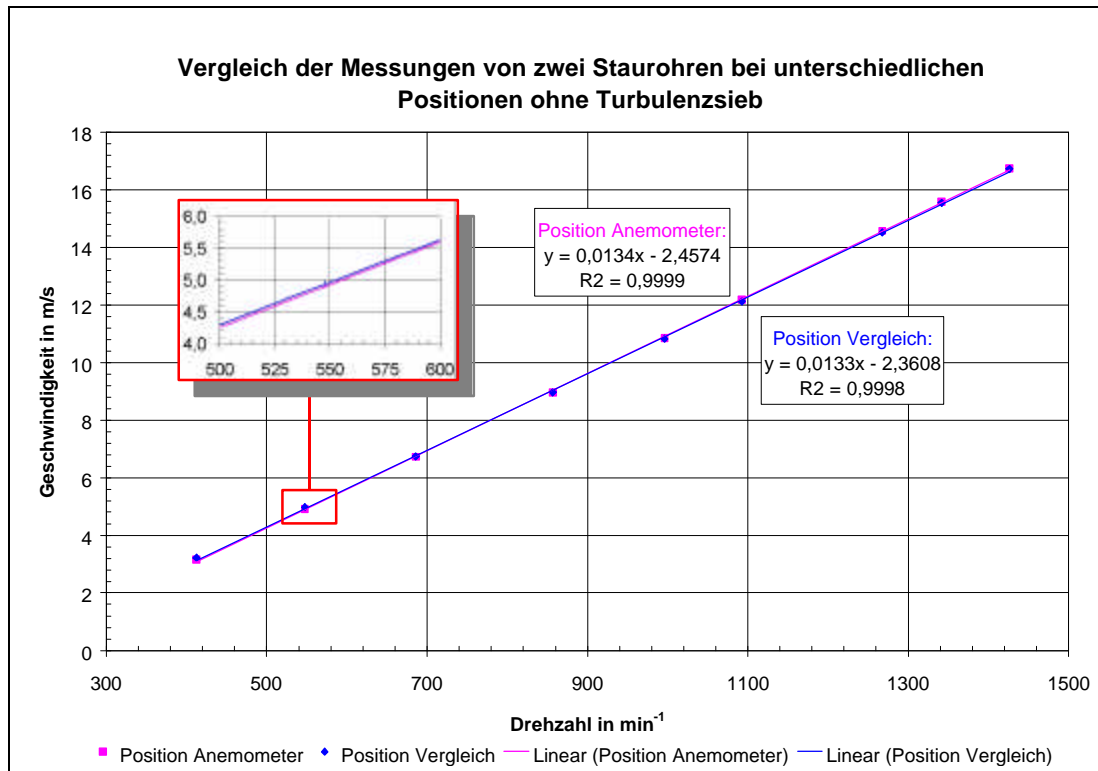


**Bild 3.4** Positionierung der Anemometer und des Prandtlschen Staurohres bei der Kalibrierung

Position 1: Referenzmessung mit dem Prandtlschen Staurohr;

Position 2: das zu kalibrierende Anemometer

Da an den unterschiedlichen Stellen des Windkanals nicht exakt die gleiche Geschwindigkeit herrscht, wurde der Einfluss der Positionierung geprüft um ggf. einen Korrekturfaktor einzuführen. Dafür wurde die Geschwindigkeit mit zwei Prandtlrohren auf der Referenzposition **1** und auf der Anemometerposition **2** gleichzeitig aufgenommen. Auf der Referenzposition wurde das für die Kalibrierung verwendete Referenz-Prandtlrohr und auf der Anemometerposition ein anderes Staurohr ähnlicher Bauart montiert (**Bild 3.4**).



**Bild 3.5** Vergleich der Messungen von zwei Staurohren bei unterschiedlichen Positionen

Es wurde auch versucht, mit dem verwendeten Referenz-Prandtlrohr auf den oben erwähnten Messpositionen nacheinander zu messen, um den Einfluss der unterschiedlichen Messposition auf den Fehler zu untersuchen. Da die Einstellung der exakt gleichen Strömungsgeschwindigkeit über die Drehzahl nur schwer möglich ist, wurde diese Messung nicht weiter berücksichtigt.

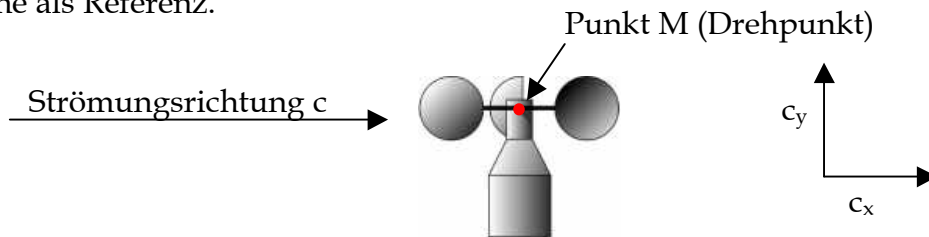
Das **Bild 3.5** zeigt, dass die aufgenommenen Geschwindigkeiten sehr gut übereinstimmen. Der Fehler ist kleiner 0,01 %. Diese beiden Messungen wurden ohne das Turbulenzsieb durchgeführt, da man, bei der Messung mit dem Prandtlrohr von der Berücksichtigung der Turbulenz absehen kann. Die Abweichung liegt im Rahmen der Messgenauigkeit, daher ist kein Positionsfaktor notwendig geworden.

### 3.4 Normalanströmung und Schräganströmung

In der Praxis ist häufig mit verschiedenen Schräganströmungen zu rechnen, da die Messgeräte oftmals an Orten aufgestellt werden, an denen der Wind durch landschaftliche oder gebäudebedingte Hindernisse umgelenkt wird. In diesem Kapitel wird nun der Einfluss dieser unterschiedlichen Einwirkungen auf die Anemometer diskutiert.

### 3.4.1 Normalanströmung

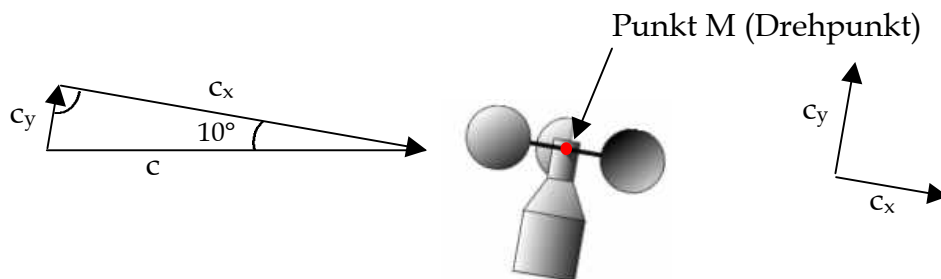
Bei der Simulation der Normalanströmung wurde das Anemometer mittig in den Windkanal positioniert (**Bild 3.6**). Die senkrechte Ausrichtung erfolgte in zwei Richtungen mit einem Lot. Die hier dargestellte Anströmung diente für die weiteren Versuche als Referenz.



**Bild 3.6** Darstellung der Normalanströmung

### 3.4.2 Schräganströmung

Bei der Simulation der schrägen Anströmung wurde das Anemometer um 10 Grad im Uhrzeigersinn geschwenkt. Idealerweise müsste man den Windkanal um diese 10 Grad neigen oder die Strömung mit Hilfe von Leitblechen umleiten, da die Lager der Anemometer auf einen senkrechten Aufbau ausgelegt sind. Der dadurch verursachte Fehler ist in **Kapitel 3.4.3** genauer untersucht worden. In **Bild 3.7** ist der durchgeführte Versuchsaufbau skizziert.



**Bild 3.7** Darstellung der Schräganströmung

Man geht davon aus, dass Anemometer eine Strömung senkrecht zu ihrer Drehachse messen. Nach dem **Bild 3.7** sollte bei einem Schrägeinbau das Anemometer nur diese senkrechte Komponente messen und somit einen kleineren Messwert der ( $c_x$ -Komponente) anzeigen. Der Betrag der Komponente  $c_x$  zur schrägen Komponente  $c$  ist in der unten stehenden Tabelle dargestellt (**Tabelle 3.1**). Die Abweichung ist mit Hilfe der einfachen Winkelfunktion

$$c_x = c \cdot \cos 10^\circ \quad (3.1)$$

berechnet worden.

**Tabelle 3.1** Abweichungswerte zur Normalanströmung

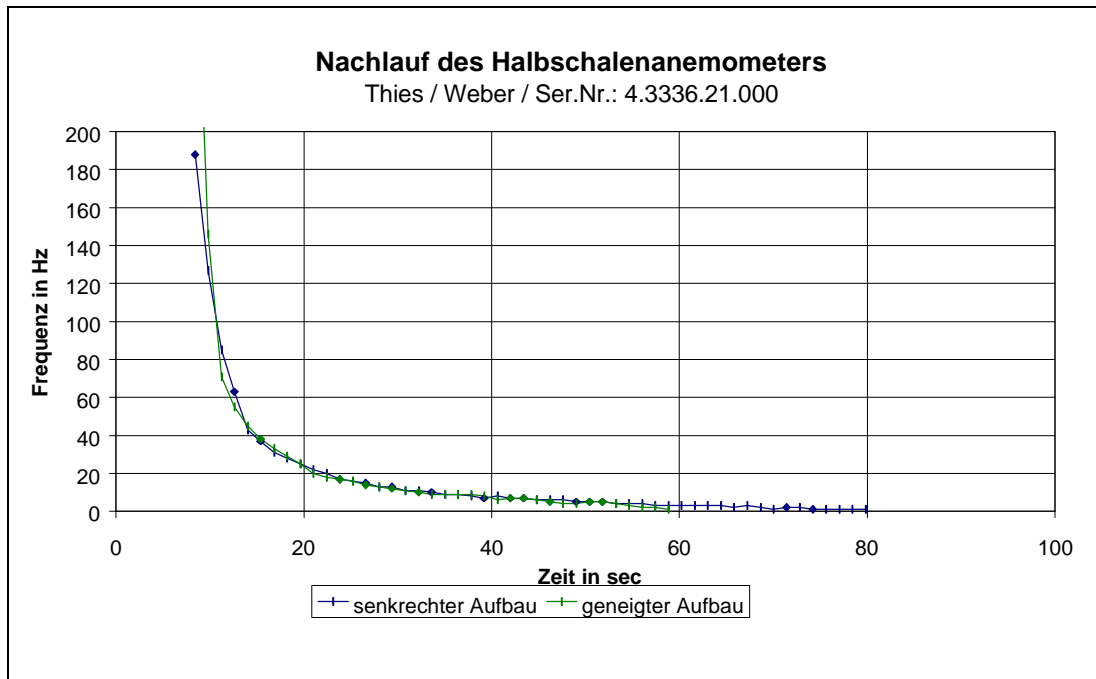
<b>Strömungsgeschwindigkeiten</b>		
Horizontalströmung $c$ in m/s	Schrägströmung $c_x$ in m/s	Abweichung $c_x - c$ in m/s
4	3,94	-0,06
5	4,92	-0,08
6	5,91	-0,09
7	6,89	-0,11
8	7,88	-0,12
9	8,86	-0,14
10	9,85	-0,15
11	10,83	-0,17
12	11,82	-0,18
13	12,80	-0,20
14	13,79	-0,21
15	14,77	-0,23
16	15,76	-0,24

In Prozent beträgt die Abweichung konstant -1,519%.

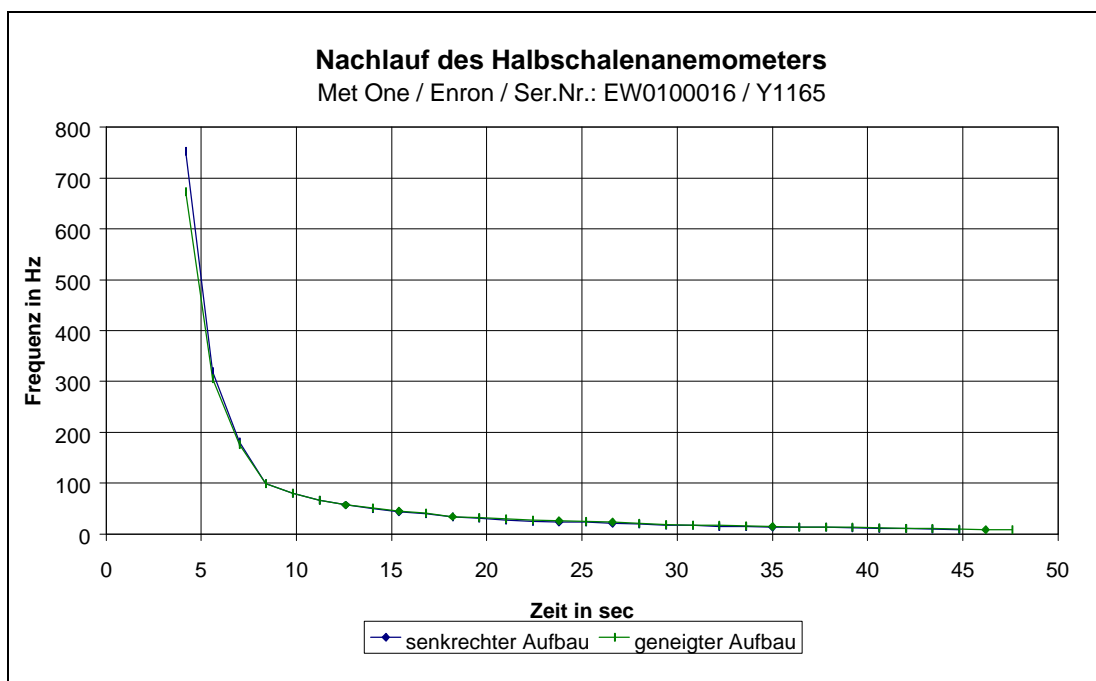
### 3.4.3 Einfluss der Schrägstellung des Anemometers auf die Messergebnisse

Die Anemometer sind für die Messung der horizontalen Windgeschwindigkeit bestimmt. Bei einem schrägen Aufbau könnte es zu Messungenauigkeiten aufgrund der eventuellen Reibung, die durch die zusätzliche Querkomponente auf das Lager wirkt, kommen. Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden die Anemometer in korrekter Aufbauweise (senkrecht) und in der geneigten Aufbauweise in einem Nachlaufversuch miteinander verglichen. Für diesen Versuch wurden die Anemometer mit Hilfe einer Druckluftpistole in Rotation versetzt. Durch die Pistole ist es möglich, einen abrupten Abbruch der Anströmung zu realisieren. Die Ausgangssignale wurden wieder mit Hilfe des DMM über den Com-Port des PCs aufgenommen. In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Untersuchung dargestellt (**Bild 3.8** und **Bild 3.9**).





**Bild 3.8** Einwirkung der 10 Grad Neigung auf das Nachlaufverhalten des Thies Anemometers

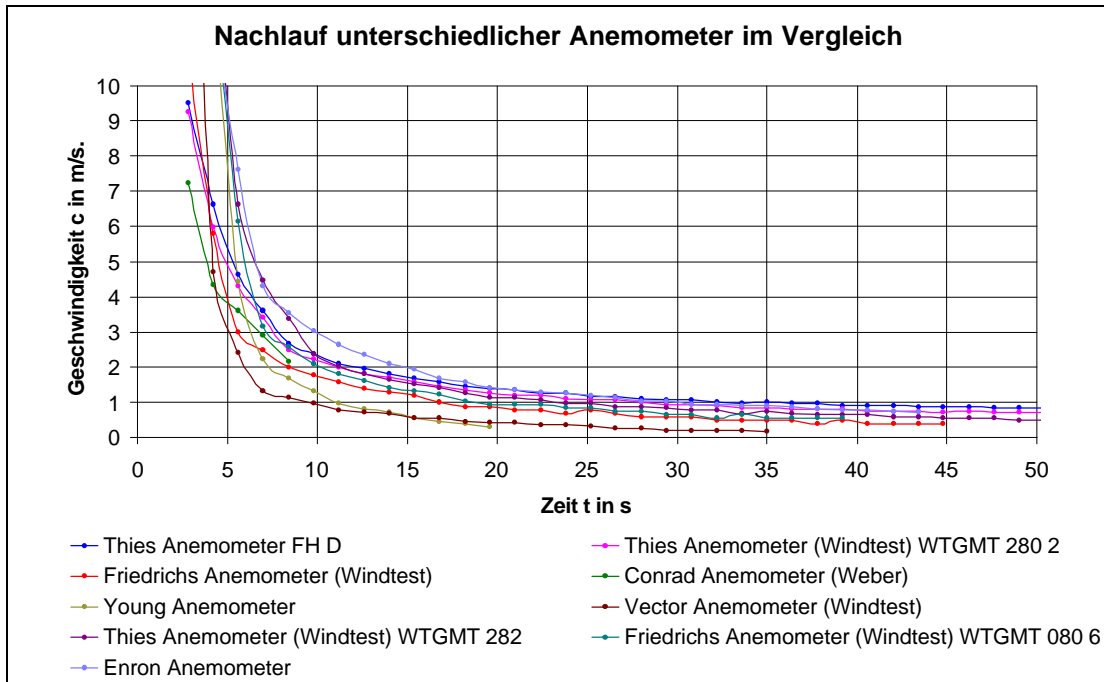


**Bild 3.9** Einwirkung der 10 Grad Neigung auf das Nachlaufverhalten des Met One Anemometers

Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass die aufgenommenen Werte zwischen geneigtem und nicht geneigtem Betrieb übereinstimmen und die Neigung der Anemometer keinen großen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Somit wird die Simulation der Schräganströmung durch die Neigung der Anemometer möglich.

### 3.4.4 Nachlaufverhalten der Anemometer

Das Nachlaufverhalten eines Anemometers ist ausschlaggebend für die schnelle Erfassung der Geschwindigkeitsschwankung. Deshalb wurden die Anemometer hinsichtlich dieses Verhaltens untersucht. Im **Bild 3.10** sind die Ergebnisse aufgeführt. Es wurde nach dem gleichen Verfahren wie im **Kapitel 3.4.3** beschrieben vorgegangen.



**Bild 3.10** Nachlaufverhalten der Anemometer im Vergleich

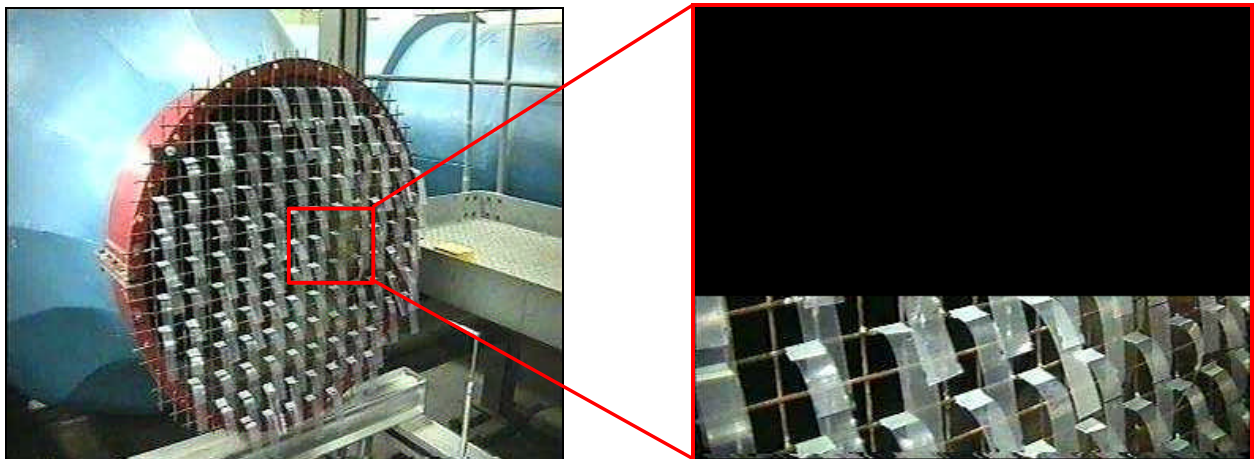
Das Anemometer ist umso besser je schneller die oben dargestellte Kurve abfällt. Es hat eine geringere Trägheit und kann deshalb schneller auf die Geschwindigkeitsschwankungen reagieren. In **Bild 3.10** weisen alle Anemometer ein ähnliches Verhalten auf.

### 3.5 Variation der Turbulenz

Um den Einfluss der Turbulenz auf die Anemometer zu untersuchen, wurden verschiedene Methoden zur Turbulenzerzeugung im Windkanal getestet. In **Bild 3.11** ist ein „Turbulenzstern“ als Beispiel zur Erzeugung einer Turbulenz dargestellt. In diesem Fall ist allerdings nur eine Erhöhung der Turbulenz im Randbereich der Strömung erzielt worden. Durch das punktuelle Messen des Turbulenzgrades mit der Fiberfilmsonde hat man sich dann für ein Turbulenzsieb, welches in **Bild 3.12** dargestellt ist, entschieden. In diesem Fall wurde über den gesamten Strömungsquerschnitt eine kontinuierliche Turbulenzerhöhung gemessen.



**Bild 3.11** Turbulenzstern zur Anhebung des Turbulenzgrades



**Bild 3.12** Gewähltes Turbulenzsieb zur Erzeugung künstlicher Turbulenzen

Zuerst wurde nur das Metallgitter zur Turbulenzerhöhung verwendet. Da aber keine große Veränderung messbar war, wurden ca. 10 cm lange Folien-Streifen an das Gitter angebracht. Diese Streifen erhöhten merklich den Turbulenzgrad. Durch die nachfolgenden Messungen sind dann Erhöhungen von 0,2 % auf 6 % gemessen worden. Somit war eine 30-fache Erhöhung der Turbulenz gegeben, mit der die Anemometer hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit auf höhere Turbulenzen untersucht werden konnten. Der Gleichanteil der Fiberfilmspannung wurde wieder mit einem Multimeter aufgenommen. Der Wechselanteil wurde mit dem HP-Analysator in einem Frequenzbereich von 10 bis 1600 Hz gemessen.

### 3.6 Beschreibung der Anemometer und grafische Darstellung der Messergebnisse

Die verschiedenen Bauarten der Schalenkreuzanemometer unterscheiden sich im Durchmesser der Halbschalen, in der Armlänge des Schalenkreuzes, in der Form der Schalen und in der Art des Ausgangssignals. Die Einen geben als Ausgangssignal eine Frequenz aus, die meist mit Hilfe einer geschlitzten Scheibe auf der Rotorachse erzeugt wird. Andere geben ein analoges Spannungssignal aus. Die Geräte mit einem Frequenzausgang benötigen zur Versorgung eine Gleichspannung von z.B. 5 bis 18 Volt. Diese Versorgungsspannung entfällt bei den sogenannten „Selbstversorgern“. Der Vorteil bei diesen Geräten ist, dass kein externes Netzteil und nur zwei Anschlussdrähte benötigt werden. Nachteilig ist allerdings der etwas höhere Anlaufwiderstand aufgrund des eingebauten „Minigenerators“.

In den Diagrammen **3.14** bis **3.29** sind auf der linken Achse die direkten Ausgangssignale der Anemometer (z.B. Frequenz) über die Strömungsgeschwindigkeit des Windkanals aufgetragen. Zur Erinnerung: Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgte mit Hilfe eines Prandtl'schen Staurohrs. Auf der rechten Achse ist die jeweilige Abweichung der einzelnen Trendlinie zur, als Referenz dienenden Normalanströmungstrendlinie aufgetragen (+: linke Achse; o: rechte Achse). Im idealen Fall liegen die Trendlinien der Normalanströmung und die der turbulenten Anströmung übereinander.

Die berechneten Abweichungen, die durch die schräge Anströmung zustande kommen, sind in den Bildern mit einer rot gestrichelten Linie als „ideale“ Abweichung zu den Werten der Normalanströmung dargestellt (Das sind die in der **Tabelle 3.1** berechneten Werte). Falls die roten Kreise in den Diagrammen also auf diese Linie fallen, misst das Anemometer den korrekten Wert  $c_x$  bei einer 10 Grad Schräganströmung.

Die durchschnittlichen Abweichungen neben den folgenden Bildern der Anemometer sind über den gesamten kalibrierten Messbereich von 4 bis 16 m/s und pro Anemometerhersteller arithmetisch gemittelt worden. Die Abweichungen bei den Schräganströmungen beziehen sich auf die in **Tabelle 3.1** berechneten idealen Werte (rot gestrichelte Linie).

#### 3.6.1 Anemometer der Firma Adolf Thies GmbH & Co. KG

Dieses Anemometer hat einen Halbschalendurchmesser von ca. 75 mm. Es ist das Anemometer mit den größten Halbschalen. Von diesem Anemometertyp sind drei Exemplare vermessen worden.



Hersteller: THIES CLIMA  
(Göttingen/Deutschland)

Anzahl der untersuchten Anemometer: 3

Technische Daten:

Schalenform: Halbkugel

Ausgangssignal: TTL-Signal

Maximale Belastung: 60 m/s

Versorgungsspannung: 4-18 VDC

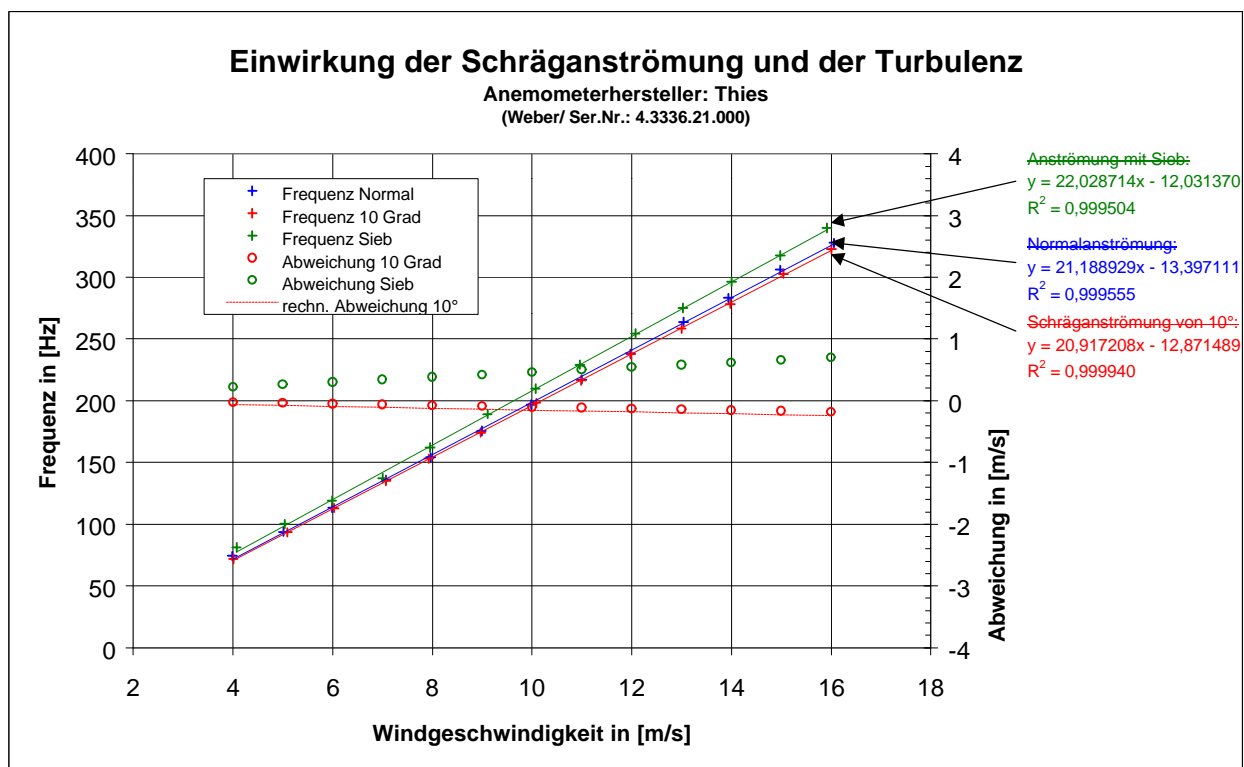
**Abweichung 1: 1,54 %**

**Abweichung 2: 5,88 %**

**Bild 3.13** THIES Typ 4.3303.22.000

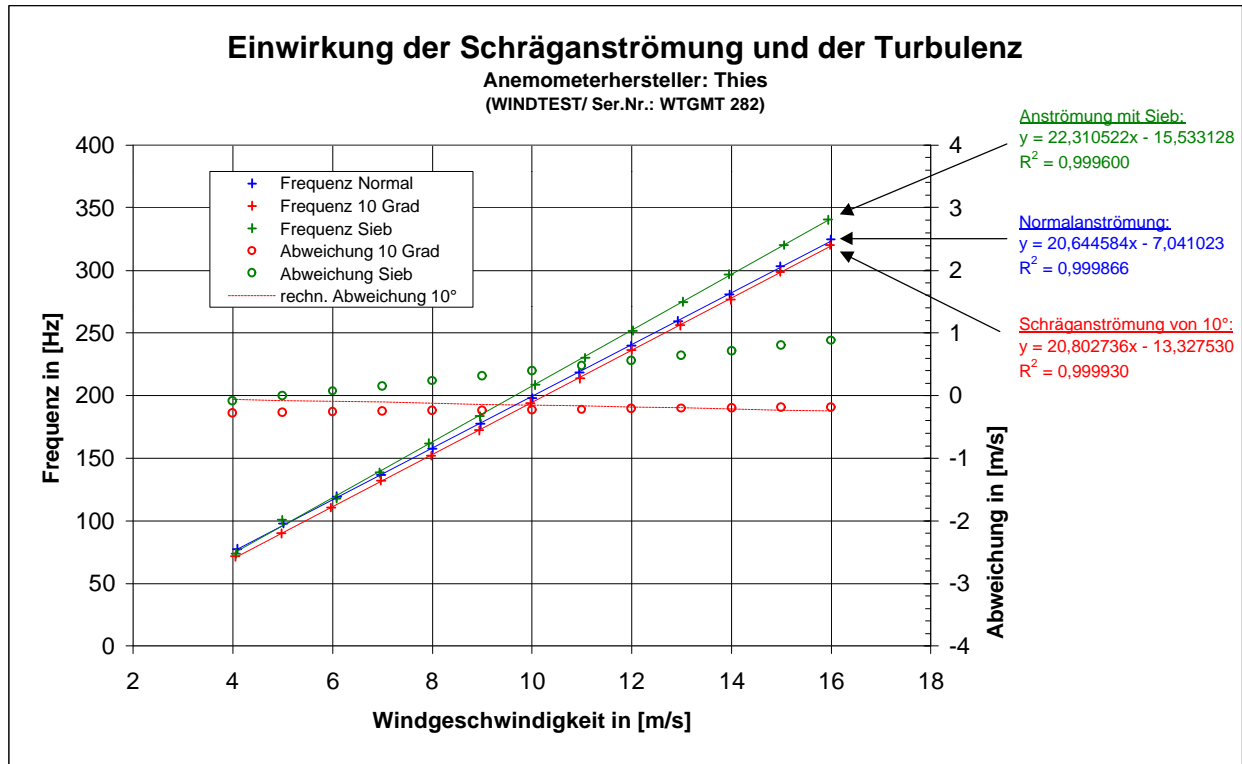
**Abweichung 1:** Absolute durchschnittliche Abweichung der gemessenen Windgeschwindigkeit bei Schräganströmung zur theoretischen Windgeschwindigkeit bei Schräganströmung.

**Abweichung 2:** Absolute durchschnittliche Abweichung der gemessenen Windgeschwindigkeit bei turbulenter Anströmung zur Normalanströmung.



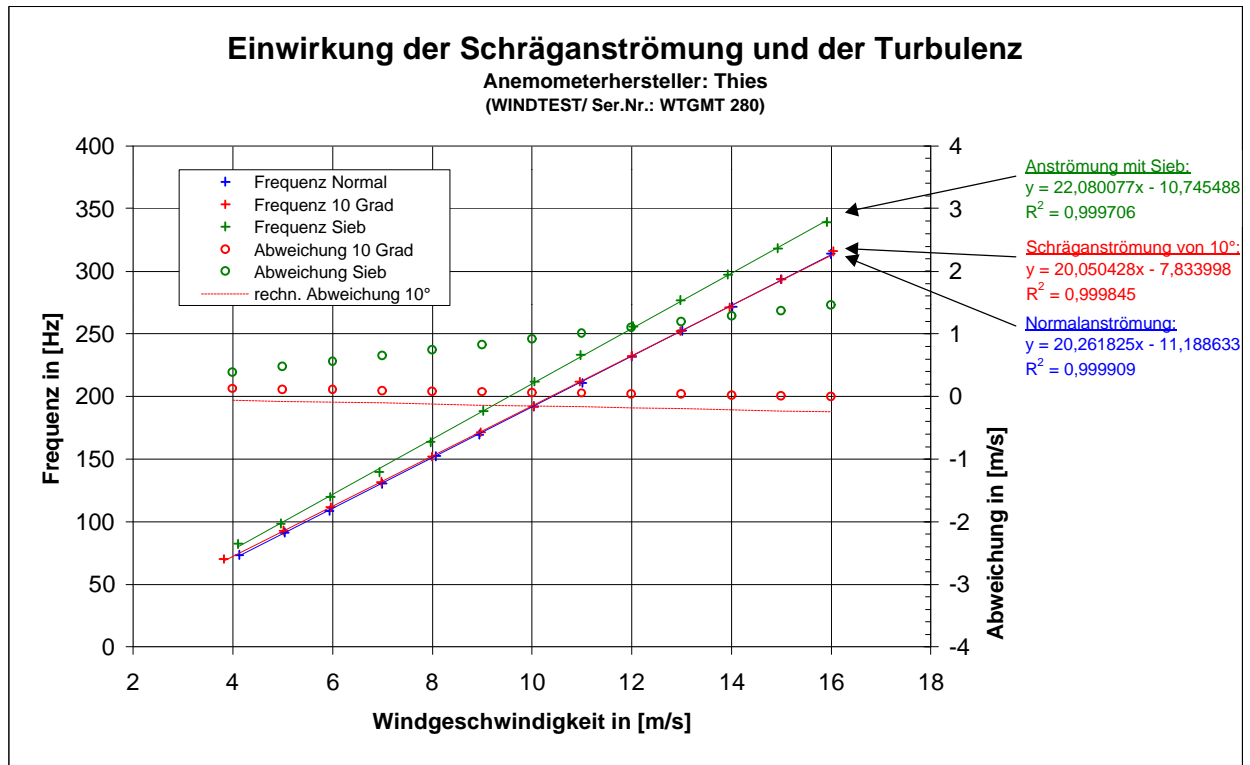
**Bild 3.14** Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; THIES der FH-Düsseldorf

In Bezug auf die Schräganströmung sind bei diesem Anemometer der Firma Thies die besten Ergebnisse erzielt worden. Hier liegen die Messpunkte alle in direkter Nähe der (rot gestrichelten) Ideallinie. Bei der turbulenten Anströmung sind erhöhte Messwerte aufgenommen worden.



**Bild 3.15** Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; THIES WTGMT282

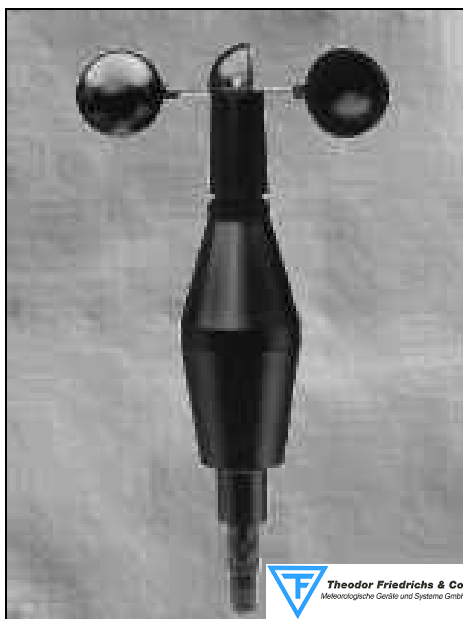
Auch bei einem anderen Anemometer der Firma THIES gleicher Bauart sind recht gute Werte bei einer Schräganströmung zu verzeichnen.



**Bild 3.16** Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; THIES WTGMT280

Bei dem Letzten der drei vermessenen Thies Geräte sind die größten Abweichungen dieser Baureihe gemessen worden. Tendenziell zeigen die Werte dieselbe Charakteristik. Dies untermauert die Korrektheit der Diagramme und ist auch bei den anderen Anemometern gleichen Herstellers aufgefallen.

### 3.6.2 Anemometer der Firma Theodor Friedrichs & Co.



Hersteller: FRIEDRICHS (Schenefeld/Deutschland)

Anzahl der untersuchten Anemometer: 2

Technische Daten:

Schalenform: Halbkugel

Ausgangssignal: TTL-Signal

Maximale Belastung: 60 m/s

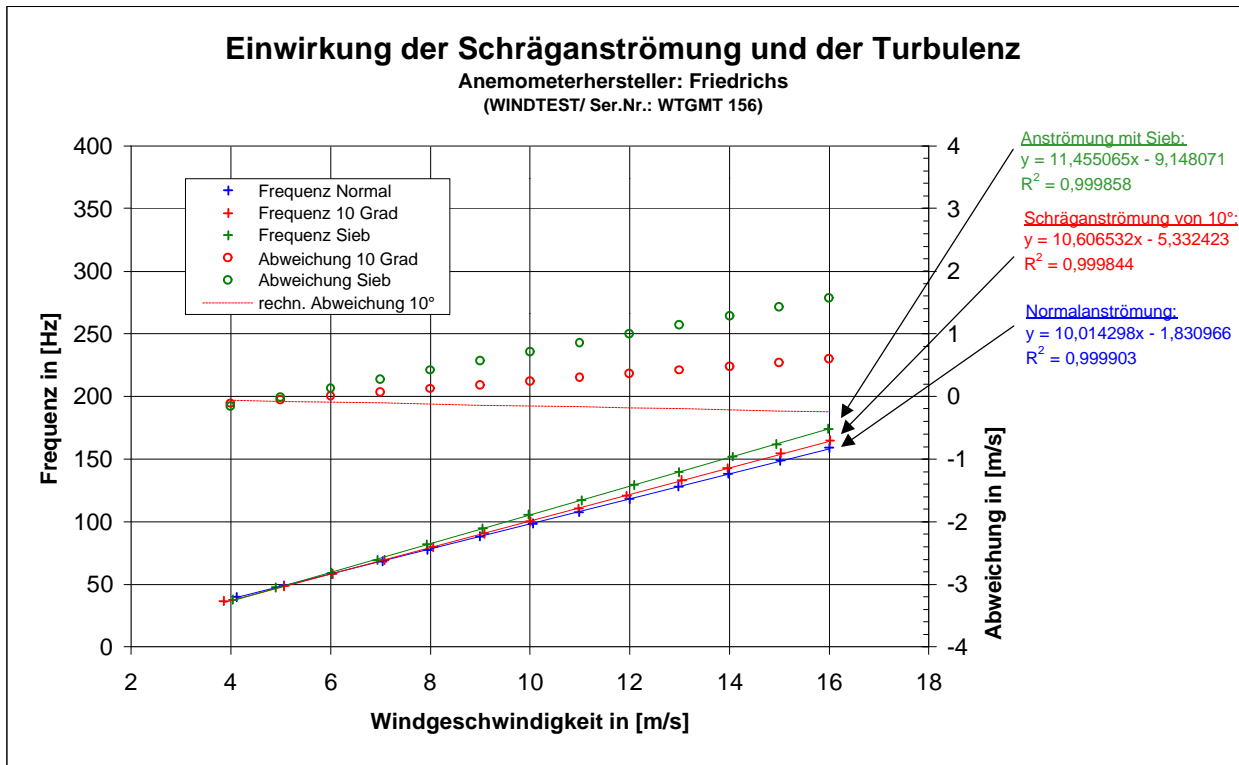
Versorgungsspannung: 9-30 VDC

**Abweichung 1: 2,90 %**

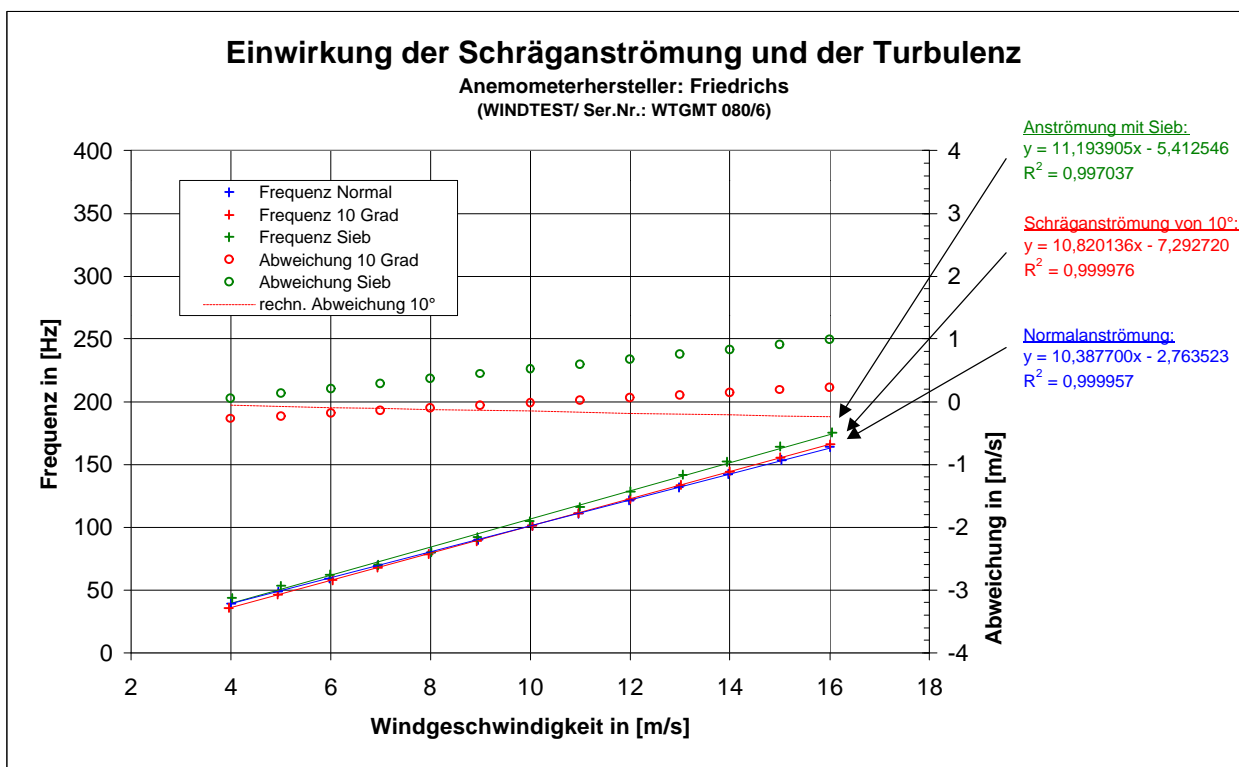
**Abweichung 2: 5,58 %**

**Bild 3.17** Friedrichs

Typ 4033.1100 [27]



**Bild 3.18** Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; Friedrichs WTGMT156



**Bild 3.19** Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; Friedrichs WTGMT080/6

Von den Anemometern der Firma Friedrichs wurden zwei vermessen. Sie sind ähnlich aufgebaut wie die THIES - Anemometer, haben aber einen etwas kleineren Halbschalendurchmesser. Es sind bei beiden Diagrammen ähnliche Linienverläufe zu



beobachten. Bei dieser Bauart ist zu erkennen, dass die Trendlinie der Schräganströmung beide Male über die der Normalanströmung liegt. Diese Anemometer haben einen relativ hohen Fehleranteil bei einer Schräganströmung.

### 3.6.3 Anemometer der Firma R. M. Young Company

Die Besonderheit dieses Anemometers ist das analoge Ausgangssignal. Es wird von einem kleinen Generator innerhalb des Schaftes erzeugt. Somit benötigt dieses Anemometer keine Versorgungsspannung und kann völlig autark betrieben werden.



Hersteller: YOUNG (Michigan/USA)

Anzahl der untersuchten Anemometer: 1

Technische Daten:

Schalenform: Halbkugel

Ausgangssignal: Analoges Spannungssignal

Maximale Belastung: 50 m/s

Abweichung 1: 2,30 %

Bild 3.20 YOUNG Typ 12102

[28]

Abweichung 2: 3,59 %

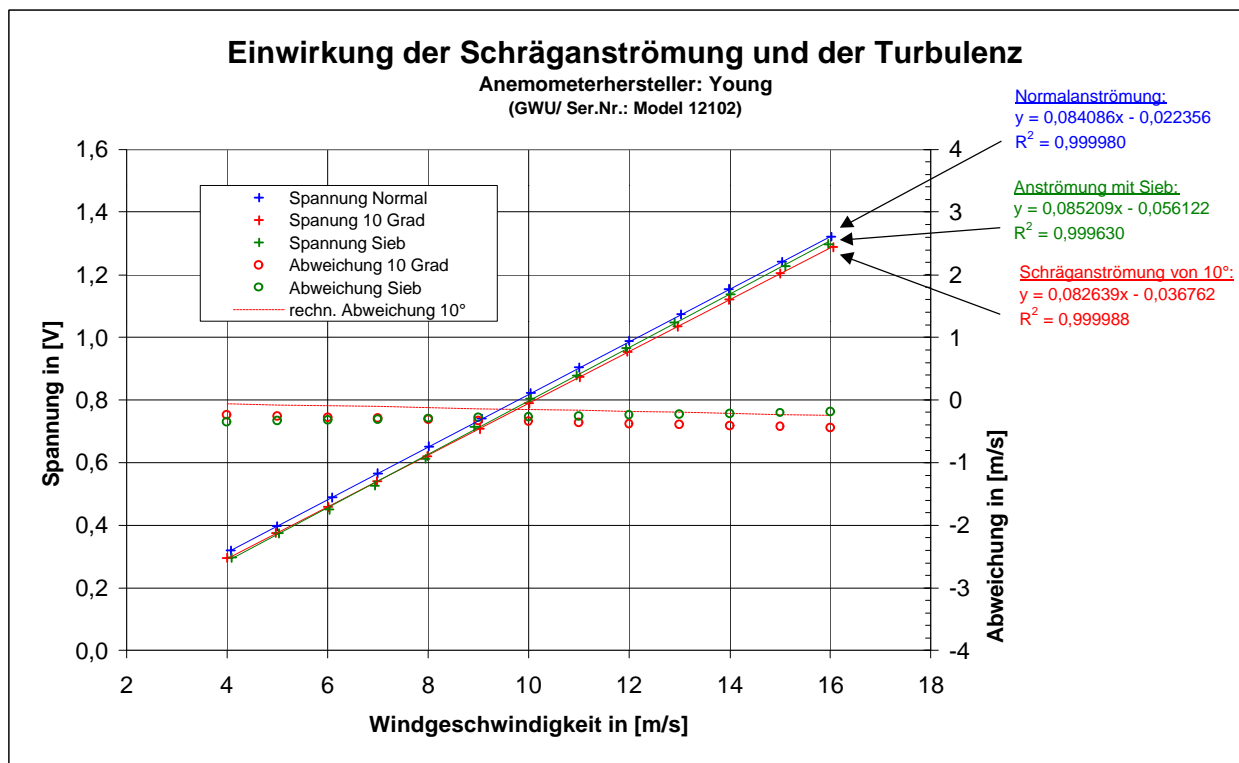


Bild 3.21 Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; YOUNG 12102

Dieses Gerät der Firma Young hat bei der turbulenten Anströmung die geringsten Abweichungen von den Kugel-Anemometern angezeigt. Die Trendlinien liegen alle drei sehr nahe beieinander. Das ist nicht optimal, da nur die grüne Linie Idealerweise auf der blauen liegen sollte, die rote aber nicht.

### 3.6.4 Anemometer der Firma Met One Instruments

Dieses Anemometer hat kegelförmige Halbschalen und ist auch von einem amerikanischen Hersteller.



Hersteller: MET ONE (Oregon/USA)

Anzahl der untersuchten Anemometer: 1

Technische Daten:

Schalenform: kegelige Halbschalen

Ausgangssignal: TTL-Signal

Maximale Belastung: 60 m/s

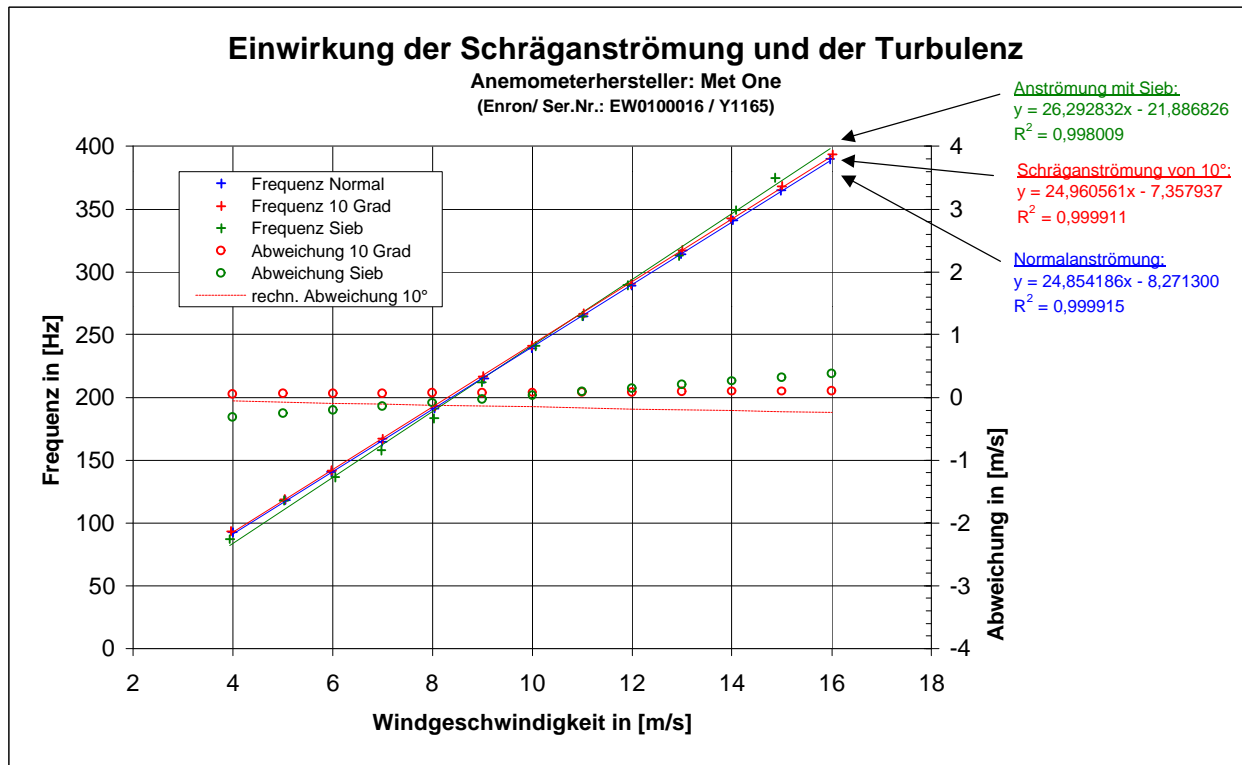
Versorgungsspannung: 12 VDC

**Abweichung 1: 5,77 %**

**Abweichung 2: 2,58 %**

**Bild 3.22** Met One Typ

Y1165 [31]



**Bild 3.23** Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; MET ONE Y1165

Bei dem Gerät der Firma Met One sind ähnliche Verläufe wie bei dem YOUNG-Anemometer festzustellen. Auch hier liegen die Trendlinien beieinander.

### 3.6.5 Anemometer der Firma Vector Instruments

Dieses Anemometer hat kegelförmige Halbschalen und hat von den vermessenen Anemometertypen die geringsten Abweichungen bei einer turbulenten Anströmung. Auch bei einer Schräganströmung sind hiermit noch recht genaue Werte mit einer durchschnittlichen Abweichung von 2,14% zu erzielen. Dieses Anemometer ist britischer Herkunft.



Hersteller: Vector (Wales/GB).

Anzahl der untersuchten Anemometer: 1

Technische Daten:

Schalenform: kegelige Halbschalen

Ausgangssignal: TTL-Signal

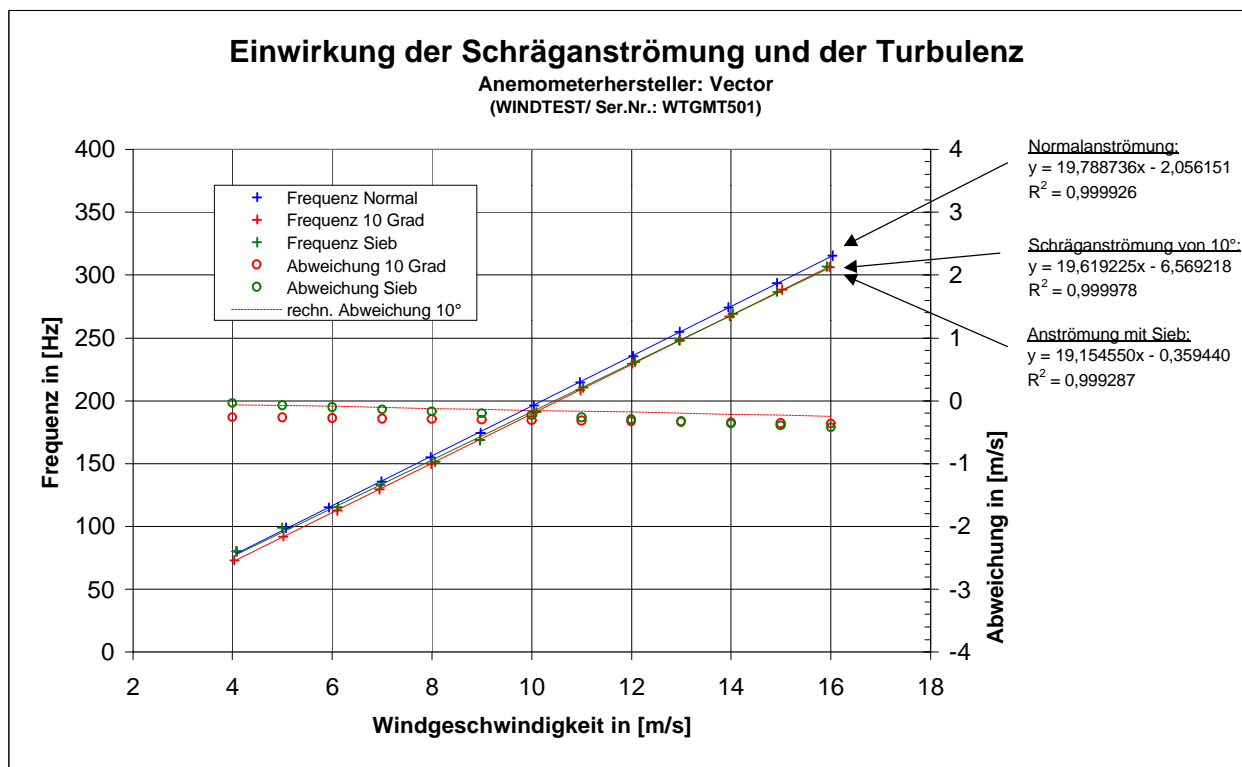
Maximale Belastung: 75 m/s

Versorgungsspannung: 7-28 VDC

**Abweichung 1: 2,14 %**

**Abweichung 2: 2,15 %**

**Bild 3.24** Vector A100L2 [30]



**Bild 3.25** Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; Vector WTGMT501

Bei diesem Anemometer sind bei einer turbulenten Anströmung geringere Messwerte aufgenommen worden. Dieser Verlauf der Trendlinie ist auch bei dem Young Anemometer aufgetreten.

### 3.6.6 Anemometer der Firma Conrad Electronics GmbH

Bei diesem Anemometer sind die größten Abweichungen bei turbulenter und schräger Anströmung festzustellen. Der Schalendurchmesser beträgt nur ca. 30 mm. Weiterhin ist es das günstigste verwendete Anemometer und ist mit einer Windfahne ausgestattet.



Hersteller: CONRAD (Hirschau/Deutschland)

Anzahl der untersuchten Anemometer: 1

Technische Daten:

Schalenform: Halbkugel

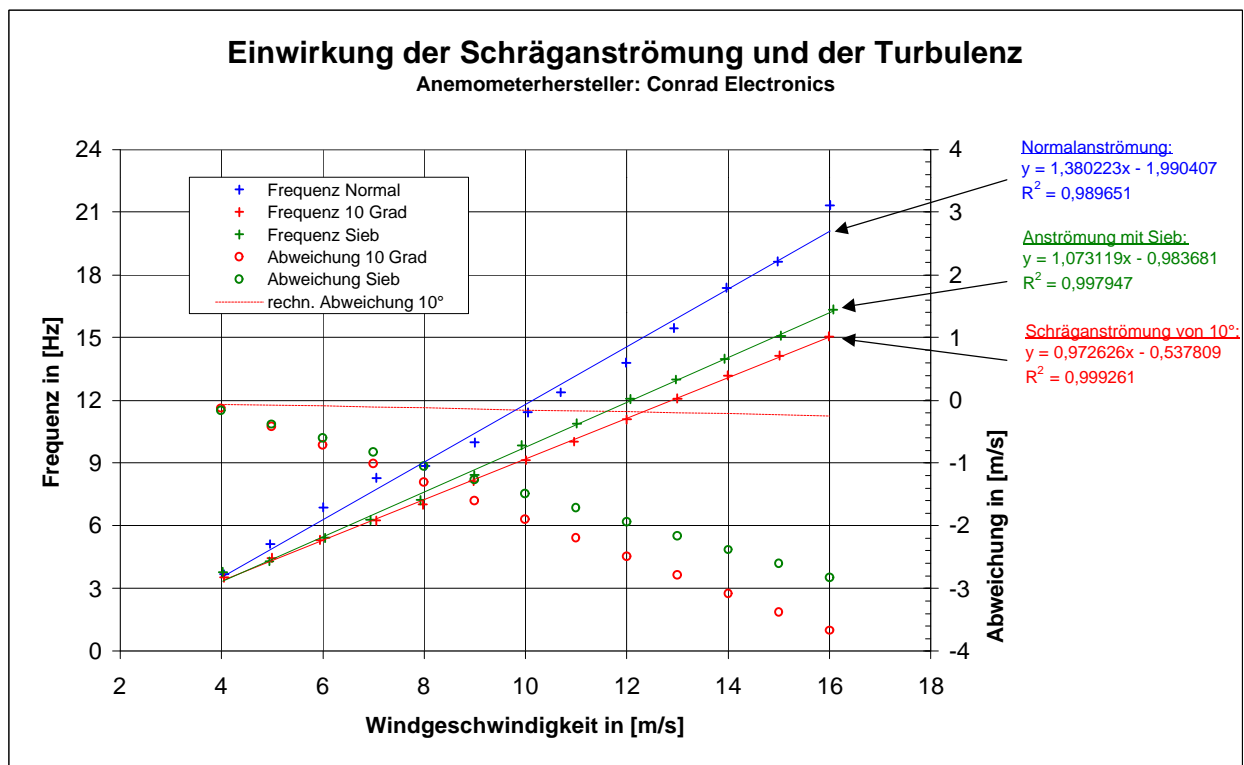
Ausgangssignal: analog

Versorgungsspannung: 5V

**Abweichung 1: 15,10 %**

**Abweichung 2: 13,30 %**

**Bild 3.26** Conrad Electronics Typ Feger + Co. Typ Wetterstation OZ-1 [29]



**Bild 3.27** Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; Conrad Electronics

### 3.6.7 Anemometer der Firma METEK GmbH

Das Ultraschallanemometer USA-1 der Firma METEK kann alle drei Komponenten der Strömungsrichtung ( $x, y, z$ ), die Temperatur und den Turbulenzgrad messen. Es besteht die Möglichkeit eine Samplingrate<sup>12</sup> von 0,1-40 Hz einzustellen und festzulegen, ob gemittelte Werte oder Rohdaten ausgegeben werden sollen.



Hersteller: METEK (Elmshorn/Deutschland)

Anzahl der untersuchten Anemometer: 1

Technische Daten:

Ausgangssignal: digital (RS232) od.- analog als Rohsignal oder gemittelte Werte.

Maximale Belastung: 60 m/s

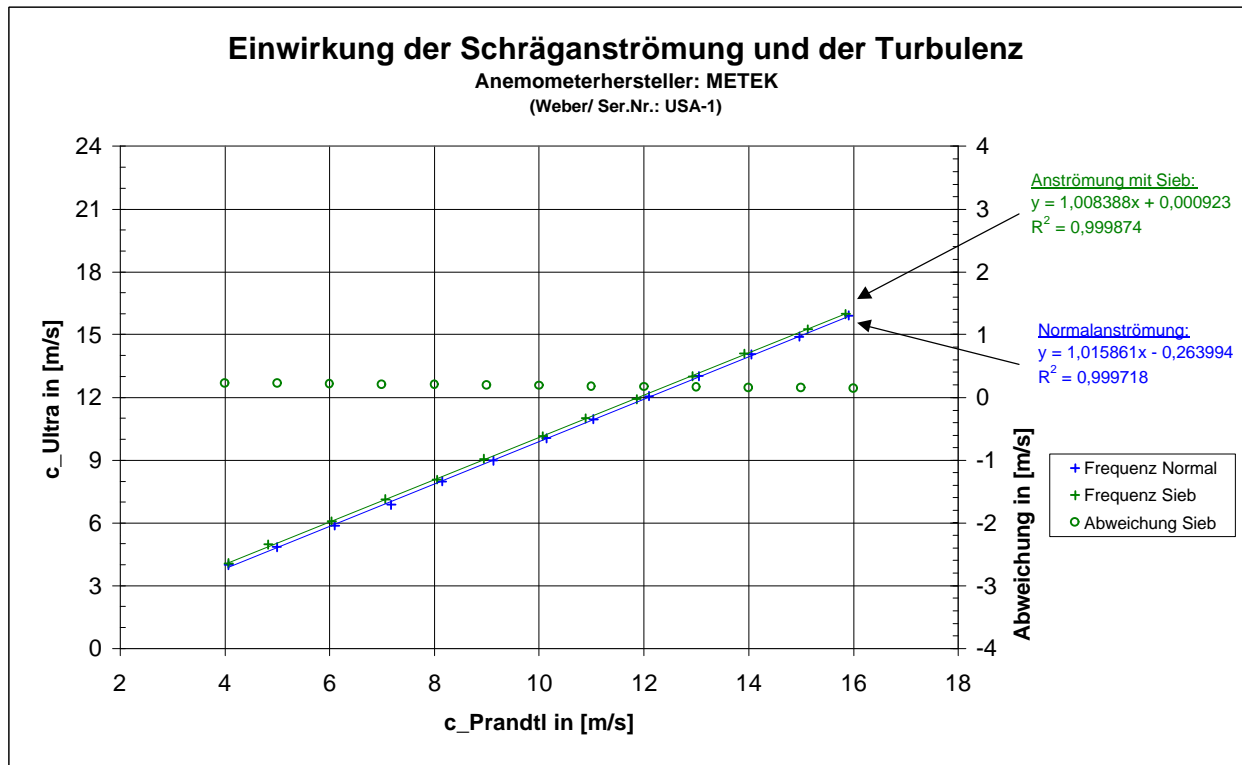
Versorgungsspannung: 9-36 VDC

**Abweichung 2: 2,47 %**

**Bild 3.28** METEK Typ USA-1 [25]

---

<sup>12</sup> Abtastrate; Abstand der Stützpunkte auf der Zeitachse (Angabe in Hertz)

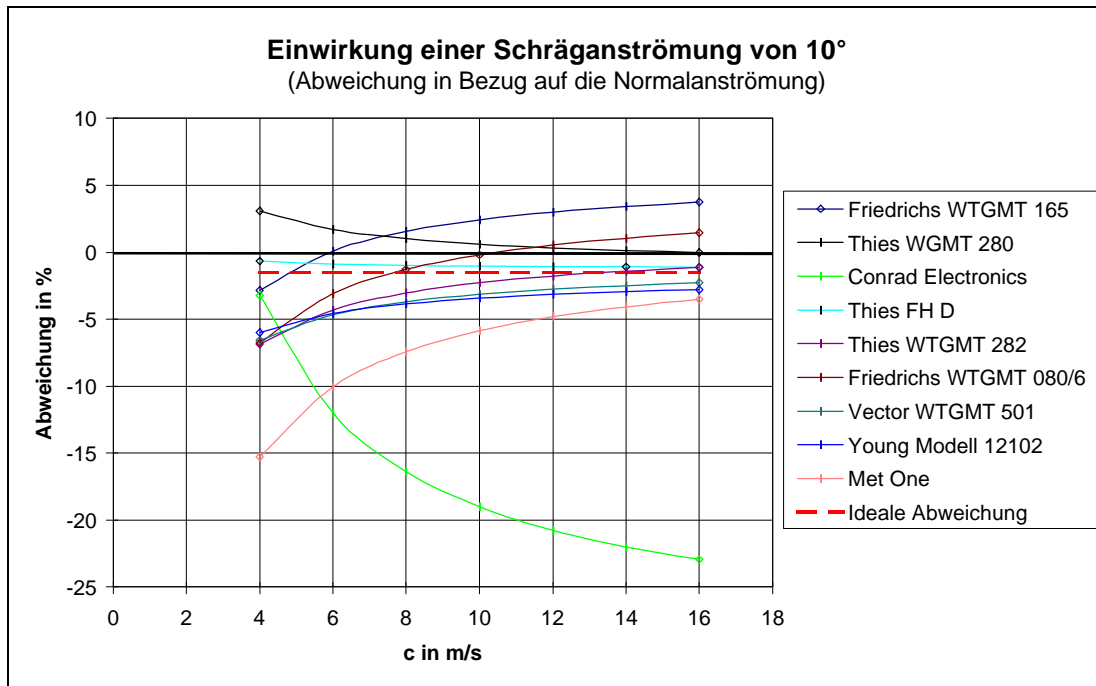


**Bild 3.29** Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; METEK USA-1

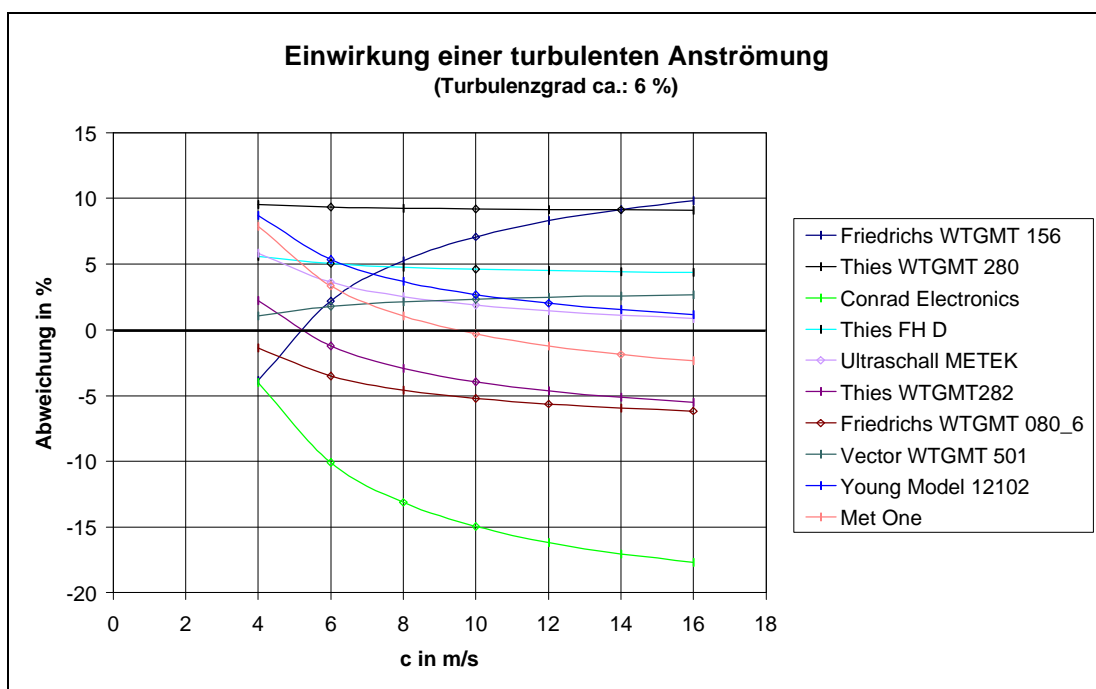
Im Falle des Ultraschallanemometers der Firma METEK ist auf eine Anströmung durch eine Neigung verzichtet worden, da dieses Gerät in allen drei Richtungen des Koordinatensystems die Strömungsgeschwindigkeit bestimmen kann und es dadurch zu keinerlei besonderen Erkenntnissen kommen würde. Aber auch hier ist eine Abweichung der Strömungsgeschwindigkeit bei turbulenter Anströmung von durchschnittlich 2,5 % gegenüber der Normalanströmung zu verzeichnen.

### 3.7 Ergebnisse der Kalibrierung

Anhand der Diagramme ist zu erkennen, dass eine turbulente Anströmung einen größeren Einfluss auf die Anemometer hat als die Einwirkung einer Schräganströmung. Auf eine sehr genaue, senkrechte Ausrichtung der Anemometer muss also nicht geachtet werden. Durch die Schräganströmung trat ein Fehler von durchschnittlich 3 % auf. Im Vergleich hierzu ist darauf hinzuweisen, dass die Hersteller durchschnittlich eine Messgenauigkeit von ca. 2 % angeben. Weiterhin wird deutlich, dass die beiden Anemometer mit den kegeligen Halbschalen geringere Abweichungen bei Turbulenzen anzeigen, als die kugeligen. Ein direkter Vergleich der Anemometer bei unterschiedlichen Anströmbedingungen ist in den **Bilder 3.30** und **3.31** dargestellt. Die Abweichungen zu der Normalanströmung ist auf der y-Achse aufgetragen.



**Bild 3.30** Direkter Vergleich der Anemometer bei einer Schräganströmung



**Bild 3.31** Direkter Vergleich der Anemometer bei einer turbulenten Anströmung

Gleiche Bauarten der Anemometer weisen gleiche Kurvenverläufe auf. Das preiswerteste Anemometer zeigt die größten Abweichungen bei beiden Anströmungen. Mit steigender Geschwindigkeit ändert sich die Steigung der Kurven. Tendenziell sinkt bei einer Schräganströmung die Steigung und bei einer turbulenten Anströmung steigt sie. Die Kurven der Schräganströmung besitzen meistens eine positive Steigung und die Steigung der Kurven einer turbulenten Anströmung ist dagegen negativ.

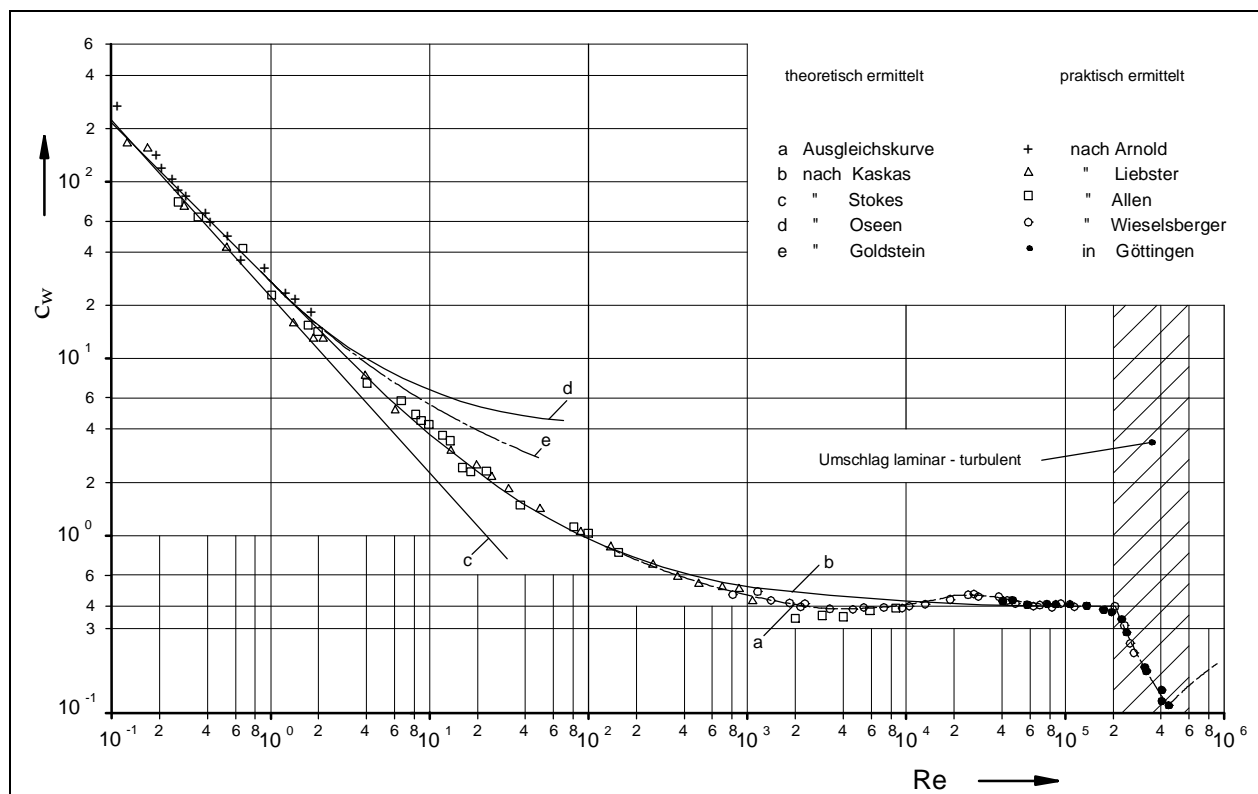


### 3.8 Abweichung der Kalibrierkurve bei turbulenter Anströmung

#### 3.8.1 Strömungswiderstand einer umströmten Kugel

Um eine Erklärung für den Anstieg der gemessenen Werte bei turbulenter Anströmung zu finden, wurde die „Theorie der Anströmung einer Kugel“ zu Hilfe genommen.

Der  $c_w$ -Wert einer umströmten Kugel nimmt mit steigender Reynoldszahl<sup>13</sup> kontinuierlich ab (**Bild 3.32**).



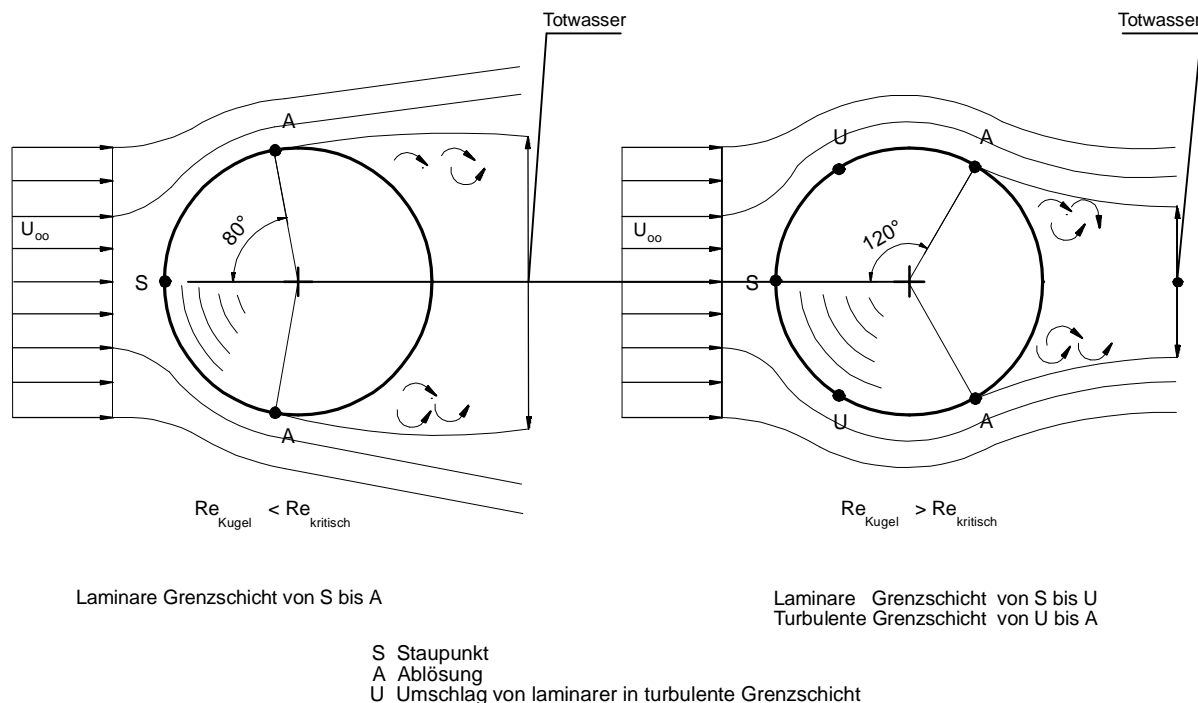
**Bild 3.32** Widerstandsbeiwert  $c_w$  in Abhängigkeit der Reynoldszahl bei einer umströmten Kugel [15]

Ab einer Reynoldszahl von ca. 200000 (kritische Reynoldszahl) beginnt die Umströmung der Kugel „turbulent“ zu werden und der  $c_w$ -Wert fällt rapide ab. Dieser Abfall ist auf die höhere kinetische Energie der turbulenten Grenzschicht und dem dadurch verursachten Versatz der Ablösestelle hinter den Meridiankreis zurückzuführen. Dadurch wird das Ablösegebiet hinter der Kugel wesentlich kleiner als bei der Umströmung mit „laminarer“<sup>14</sup> Grenzschicht (**Bild 3.33**) und der

<sup>13</sup>dimensionslose Kennzahl. Verhältnis der Trägheitskraft zur Reibungskraft.  $Re = (c \cdot D) / \nu$

<sup>14</sup> in stabilen, nicht verwirbelten Schichten gleitend (Gase, Flüssigkeiten)

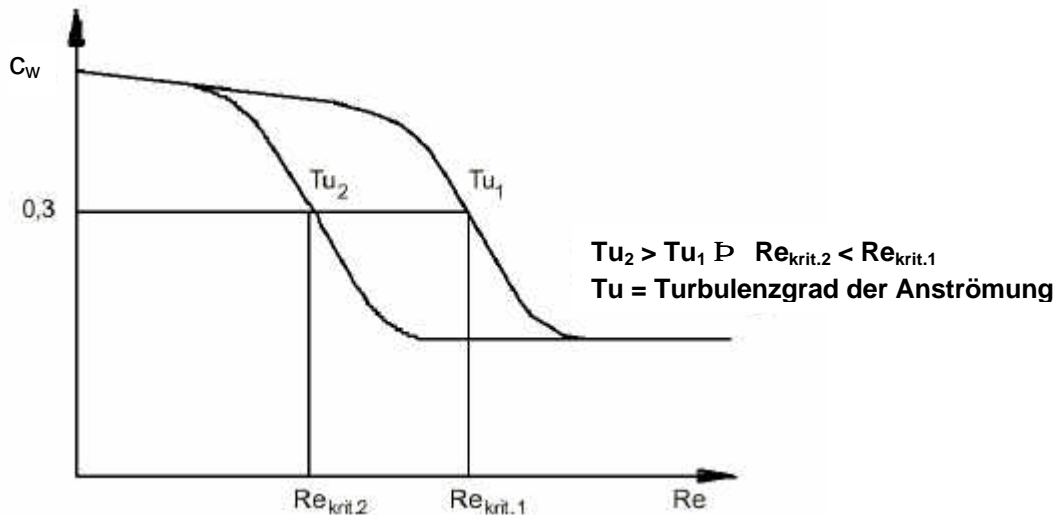
Widerstandsbeiwert fällt. Teilweise wird in der Literatur hier auch von einer „überkritischen Umströmung“ der Kugel gesprochen [15].



**Bild 3.33** Kugelumströmung bei „laminarer“ und „turbulenter“ Grenzschicht [15]

Dies ist auch der Grund weswegen Golfbälle eine strukturierte Oberfläche bekommen. Denn durch die entstehende turbulente Grenzschicht sinkt der  $c_w$ -Wert und der Golfball fliegt um einiges weiter.

In **Bild 3.34** wird der Einfluss der Turbulenz auf die  $c_w$ -Wert-Kurve verdeutlicht. Je höher der Turbulenzgrad ist, um so stärker verschiebt sich die Kurve in Richtung der  $c_w$ -Achse. Somit sinkt also auch die kritische Reynoldszahl bei höherer Turbulenz. In wie weit sich die Kurve betragsmäßig in Richtung der  $c_w$ -Achse verschiebt, ist nicht genauer untersucht worden.



**Bild 3.34** Einwirkung des Turbulenzgrades der Anströmung auf den  $c_w$ -Wert einer Kugel [15]

### 3.8.2 Reynoldszahlen einer umströmten Kugel

Die unterschiedlichen Anemometer besitzen einen Halbschalendurchmesser von ca. 30 bis 75 mm. Hiermit errechnet sich mit Gleichung (3.2) eine Reynoldszahl von:

$$Re = \frac{c \cdot d_{\text{Kugel}} \cdot \rho_{\text{Luft}}}{\eta_{\text{Luft}}} \quad [15] \quad (3.2)$$

mit  $\rho_{\text{Luft}} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  und  $\eta_{\text{Luft}} = 1,82 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \Rightarrow$

$Re_{\text{max}}: \quad c=16 \text{ m/s} \quad d_{\text{Kugel\_Max}}= 0,075 \text{ m} \Rightarrow \quad \mathbf{Re_{\text{max}} \gg 80000}$

$Re_{\text{min}}: \quad c=4 \text{ m/s} \quad d_{\text{Kugel\_Min}}= 0,03 \text{ m} \Rightarrow \quad \mathbf{Re_{\text{min}} \gg 8000}$

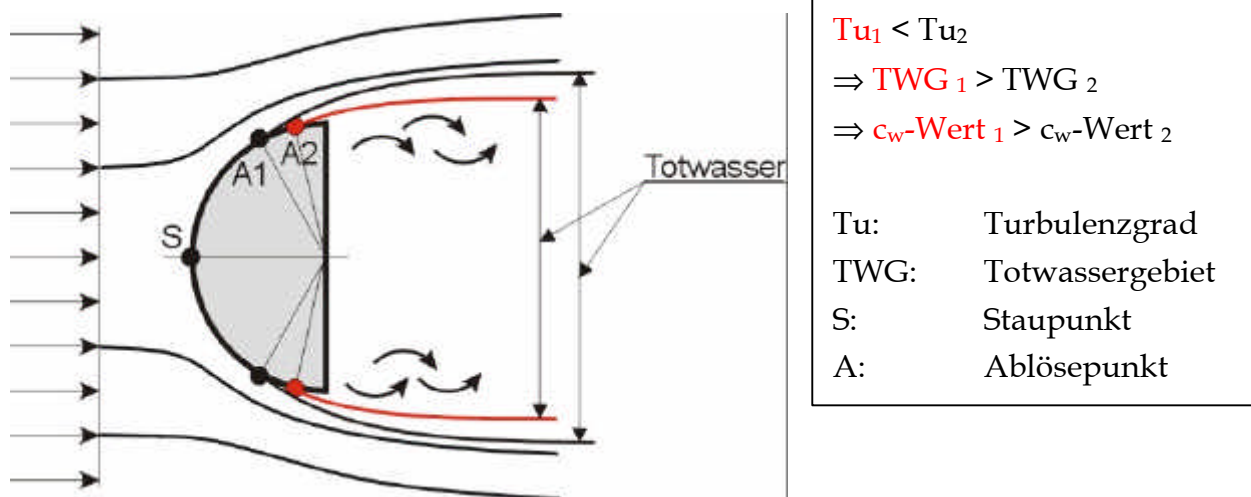
Hieraus ist zu erkennen, dass sich die Halbkugeln im laminaren Bereich befinden.

Um die „kritische Reynoldszahl“ von ca. 200000 mit dem Durchmesser der Halbschale von 75 mm zu erreichen, müsste man ohne Turbulenzerhöhung eine Strömungsgeschwindigkeit von mindestens 40 m/s erzeugen.

### 3.8.3 Fazit

Der Grund für die Drehzahlerhöhung des Anemometers bei einer turbulenten Anströmung ist eventuell mit der Verschiebung des Ablösepunktes der Strömung zu erklären. In **Bild 3.35** ist diese Ursache veranschaulicht worden. Hier soll die Stromlinie, welche vom Ablösepunkt A1 entspringt, den Normalfall darstellen. Die rote Linie, die aus dem Ablösepunkt A2 startet, zeigt den Fall bei einer turbulenteren Anströmung. Durch dieses Verhalten verkleinert sich im zweiten Fall das Totwassergebiet und somit auch der  $c_w$ -Wert. Diese Überlegung gilt nur für die konvexe Seite des Schalenkreuzes.

Auf die konkave Seite hat die Turbulenzerhöhung einen nicht so großen Einfluss. Im Vergleich zu dem  $c_w$ -Wert der konvexen Schale steigt der  $c_w$ -Wert der konkaven Seite also stärker, womit die Drehzahlerhöhung zu erklären ist.



**Bild 3.35** Änderung des Totwassergebietes bei erhöhter Turbulenz (schematisch)



## Zusammenfassung

Aufgabe der vorliegenden Untersuchung war es, den Einfluss der Turbulenz und der schrägen Anströmung bei der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit mit unterschiedlichen Anemometern zu bestimmen.

Nach dem Vergleich unterschiedlicher Kalibrierkurven der Anemometer wurde festgestellt, dass die Turbulenz grundsätzlich einen Einfluss auf die Messwerte aller untersuchten Anemometer hat. Bei den Anemometern mit Halbkugeln, die üblicherweise in Deutschland verwendet werden, wurden größere Abweichungen bei der turbulenten Anströmung festgestellt, als bei den in Dänemark häufig verwendeten kegelförmigen Anemometern. Die kegelförmigen Anemometer zeigen bei einer turbulenten Strömung im Mittel einen um 2,6 % erhöhten Wert an als bei der Messung ohne die turbulente Anströmung. Die Anemometer mit den Halbkugeln haben unter diesen Bedingungen einen fast doppelt so hohen Messfehler von ca. 5,0 %. Die kegelförmigen Halbschalenanemometer liefern bei turbulenter Anströmung demnach genauere Messwerte als die halbkugelförmigen. Daher ist bei erhöhter Turbulenz der Anströmung und gleichbleibenden Versuchs- und Messbedingungen alleine durch den Wechsel der Halbschalenform mit unterschiedlichen Leistungskurven zu rechnen. Die Messungen mit dem Ultraschallanemometer bei der turbulenten Anströmung ergaben eine Abweichung von 2,5 Prozent. Für die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit unter hoher Turbulenz empfiehlt sich daher die Anwendung eines Ultraschallanemometers oder eines Anemometers mit kegelförmigen Halbschalen.

Bei einer schrägen Anströmung (untersucht wurde eine Schräganströmung von 10 Grad) wurden gleiche Tendenzen bei Halbkugelanemometer und den Halbkegelanemometer festgestellt. In beiden Fällen waren die Abweichungen zum Messwert gering (im Mittel 2,9 %). Auch bei den Anemometern ähnlicher Bauweise, aber von unterschiedlichen Herstellern, wurden Diskrepanzen festgestellt.

Das preiswerteste Anemometer hat bei diesen Untersuchungen die schlechtesten Messergebnisse erzielt und wurde daher nicht bei der Bestimmung der mittleren Abweichung aller Anemometer berücksichtigt.

Sollte bei einer Windmessung erhöhte Turbulenz und zusätzlich noch eine Schräganströmung auftreten so ist mit Fehlern von 1,2 % bis 10,2 % zu rechnen. Die durchschnittlich geringste Abweichung in diesem Zusammenhang erzielte das YOUNG Anemometer und die größte Abweichung das THIES WTGMT280 Anemometer. Zur Berechnung dieser Abweichung wurden die Fehler der turbulenten Anströmung mit den Fehlern einer Schräganströmung verrechnet. Wird eine präzise Messung der Strömungsgeschwindigkeit notwendig, so ist der Einsatz eines qualitativ hochwertigen Anemometers zu empfehlen. Da bei Ultraschallanemometern eine Schräganströmung keinen zusätzlichen Fehler verursacht, ist der Einsatz dieses Typs sinnvoll.



## Literaturverzeichnis

- [1] Schade, Kunz ***Strömungslehre***  
Walter de Gruyter Berlin (1989)
- [2] Fiedler, Otto ***Strömungs- und Durchflussmesstechnik***  
R. Oldenburg Verlag München Wien (1992)
- [3] Gasch, Robert ***Windkraftanlagen***  
B G Teubner Stuttgart (1996)
- [4] Deutsches Windenergie-Institut GmbH ***Aufstellungszahlen der Windenergienutzung in Deutschland***  
[www.dewi.de](http://www.dewi.de)
- [5] VDI Richtlinie 3786 ***Turbulenzmessung mit Ultraschall-Anemometern***  
Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf (1994)
- [6] VDI-Richtlinie 3786 ***Bestimmung des vertikalen Windprofils mit Doppler-SODAR-Messgeräten***  
Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf (1994)
- [7] Denk, V.; Grießer, H. ***Anleitung zum aerodynamischen Praktikum***  
Grünzweig & Hartmann AG, Ludwigshafen (1968)
- [8] ADOLF THIES GmbH & Co. KG ***Homepage der Firma ADOLF THIES GmbH & Co. KG, Göttingen***  
[www.thiesclima.com](http://www.thiesclima.com)
- [9] Airflow Lufttechnik GmbH ***Homepage der Firma Airflow Lufttechnik GmbH, Rheinbach***  
[www.airflow.cz](http://www.airflow.cz)



- [10] Einstein.DE GmbH ***Homepage der Firma Einstein.DE GmbH, Laatzen***  
[www.einstein.de/pda](http://www.einstein.de/pda)
- [11] AMMONIT Gesellschaft für Messtechnik mbH ***Homepage der Firma AMMONIT Gesellschaft für Messtechnik mbH, Berlin***  
[www.ammonit.de](http://www.ammonit.de)
- [12] Universität Zürich ***Homepage der Universität Zürich***  
[www.unizh.ch](http://www.unizh.ch)
- [13] METEK GmbH ***Homepage der Firma METEK GmbH, Elmshorn***  
[www.metek.de](http://www.metek.de)
- [14] Verband der dänischen Windkraftindustrie ***Homepage des Verbandes der dänischen Windkraftindustrie, Kopenhagen, Dänemark***  
[www.windpower.dk](http://www.windpower.dk)



# Anhang

## Kalibrierprotokolle

### Young 12102

report of

#### Normalanströmung

anemometer manufacturer:	Young
type:	Schalenkreuz
serial number:	12102
converter:	-

#### FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

Customer:		Unterschrift
date:	11.04.01	
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

#### first calibration:

date of calibration:	11.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1015,9 hPa
air temperature:	22,1 °C
humidity:	38,5 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

#### optional: second calibration

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

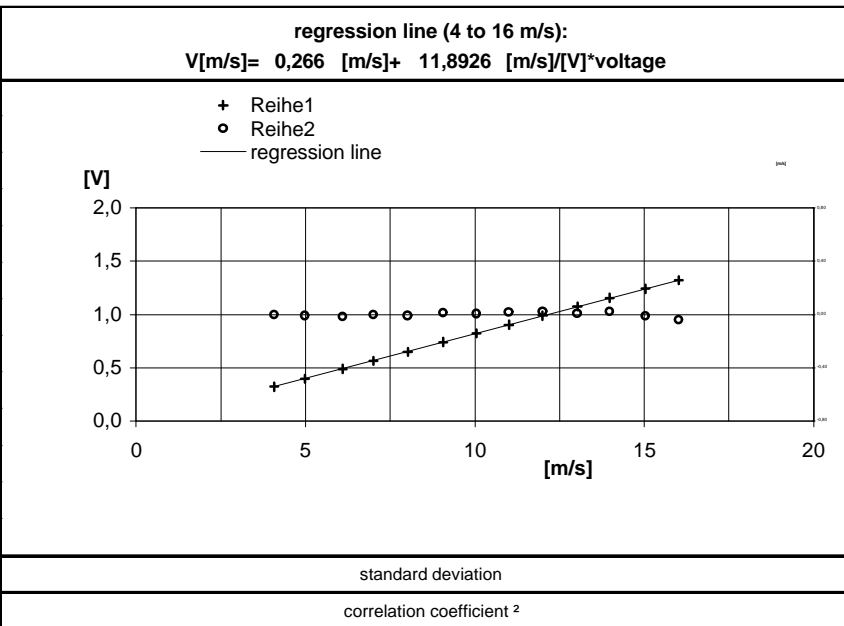
the complete procedure is documentet in the diploma thesis

### Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen

#### first

flow speed [m/s]	voltage at speed [V]
4,07	0,32
6,09	0,49
8,02	0,65
10,04	0,82
12,00	0,99
13,98	1,16
16,02	1,32
15,04	1,24
13,03	1,07
11,00	0,90
9,07	0,74
7,00	0,57
4,99	0,40
0,0176 [m/s]	standard deviation
0,99998	correlation coefficient <sup>2</sup>

#### second



flow speed [m/s]	voltage at speed [V]

voltage at 4.0 [m/s]	0,31 [V]
voltage at 8.0 [m/s]	0,65 [V]
voltage at 12.0 [m/s]	0,99 [V]
voltage at 16.0 [m/s]	1,32 [V]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,00 [m/s]= 0,0 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,1 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,19 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,04 [m/s]= 0,25 %

wind speed at 0,5 [V]	6,2 [m/s]
wind speed at 1,0 [V]	12,2 [m/s]
wind speed at 1,5 [V]	18,1 [m/s]

Remarks

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)





report of

**Schräganströmung von ca. 10°**

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

anemometer manufacturer:	Young
type:	Schalenkreuz
serial number:	12102
converter:	-

Customer:		
date:	11.04.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	11.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1015,9 hPa
air temperature:	22,1 °C
humidity:	37,5 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemonometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

**first**

**second**

flow speed [m/s]	voltage at speed [V]	regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,445 [m/s]+ 12,1008 [m/s]/[V]*voltage$	flow speed [m/s]	voltage at speed [V]
4,00	0,30	<p>+ Reihe1 o Reihe2 — regression line</p>		
6,01	0,46			
7,99	0,62			
10,01	0,79			
11,97	0,95			
13,98	1,12			
16,06	1,29			
15,01	1,20			
12,97	1,04			
11,02	0,87			
9,02	0,71			
6,99	0,54			
4,97	0,38			
0,0137 [m/s]			standard deviation	
0,999988		correlation coefficient <sup>2</sup>		

voltage at 4.0 [m/s]	0,29 [V]
voltage at 8.0 [m/s]	0,62 [V]
voltage at 12.0 [m/s]	0,95 [V]
voltage at 16.0 [m/s]	1,29 [V]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,5 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,18 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,11 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,09 %

wind speed at 0,5 [V]	6,5 [m/s]
wind speed at 1,0 [V]	12,5 [m/s]
wind speed at 1,5 [V]	18,6 [m/s]

**Remarks**

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



report of

**turbulente Anströmung von ca. 6%**

anemometer manufacturer:	young
type:	Schalenkreuz
serial number:	12102
converter:	-

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

Customer:		Unterschrift
date:	11.04.01	
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	11.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1015,9 hPa
air temperature:	22,1 °C
humidity:	38,5 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemonometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

first		regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s] = 0,659 [m/s] + 11,7358 [m/s]/[V] * \text{voltage}$	second		
flow speed [m/s]	voltage at speed [V]		flow speed [m/s]	voltage at speed [V]	
4,09	0,30				
6,04	0,45				
7,94	0,61				
10,03	0,81				
11,94	0,97				
14,01	1,14				
15,96	1,30				
15,11	1,23				
12,90	1,05				
10,95	0,88				
8,92	0,71				
6,94	0,53				
5,03	0,37				
0,0747 [m/s]			standard deviation		[m/s]
999630			correlation coefficient <sup>2</sup>		

voltage at 4.0 [m/s]	0,28 [V]
voltage at 8.0 [m/s]	0,63 [V]
voltage at 12.0 [m/s]	0,97 [V]
voltage at 16.0 [m/s]	1,31 [V]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,05 [m/s]= 1,1 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,10 [m/s]= 1,21 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,05 [m/s]= 0,44 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,07 [m/s]= 0,44 %

wind speed at 0,5 [V]	6,5 [m/s]
wind speed at 1,0 [V]	12,4 [m/s]
wind speed at 1,5 [V]	18,3 [m/s]

**Remarks**

--

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)
---



### Vektor A100L2

report of

#### Normalanströmung

anemometer manufacturer:	Vector
type:	A100L2
serial number:	WTGMT501
converter:	-

#### FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

Customer:		
date:	11.04.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

#### first calibration:

date of calibration:	11.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1015,284615 hPa
air temperature:	23,3 °C
humidity:	37,9 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

#### optional: second calibration

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

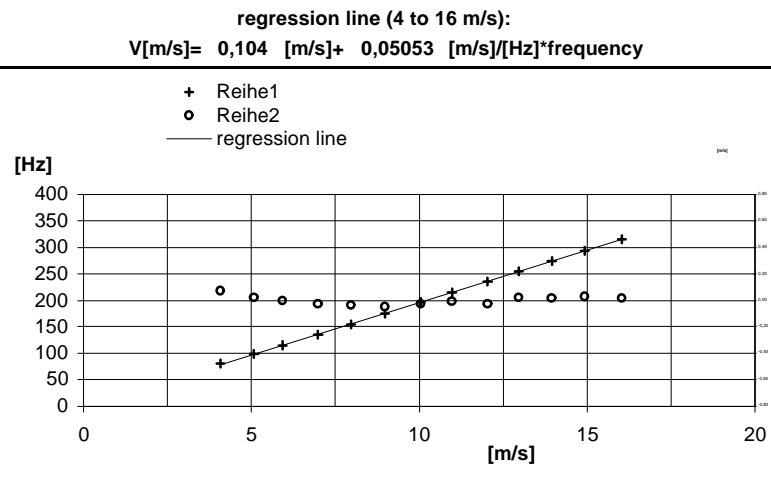
the complete procedure is documentet in the diploma thesis

### Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemonometern für den Einsatz an Windkraftanlagen

#### first

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,08	80,14
5,93	115,16
7,97	154,88
10,05	196,23
12,04	235,57
13,95	274,27
16,03	315,48
14,92	293,75
12,96	254,93
10,97	214,86
8,97	174,55
6,99	135,68
5,08	98,86
0,0332 [m/s]	standard deviation
0,999926	correlation coefficient <sup>2</sup>

#### second



frequency at 4.0 [m/s]	77,10 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	156,25 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	235,41 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	314,56 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,07 [m/s]= 1,73 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,04 [m/s]= 0,47 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,22 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,11 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,147 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	8,189 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	16,275 [m/s]

#### Remarks

--

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)
---



report of

**Schräganströmung von ca. 10°**

anemometer manufacturer:	Vector
type:	A100L2
serial number:	WTGMT501
converter:	-

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

Customer:		
date:	11.04.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	11.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1015,815385 hPa
air temperature:	22,8 °C
humidity:	38,6 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

first		<p>regression line (4 to 16 m/s):</p> $V[m/s]= 0,335 [m/s]+ 0,05097 [m/s]/[Hz]*frequency$	second		
flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]		flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	
4,04	73,16				
6,10	112,86				
7,98	149,74				
10,04	190,44				
12,01	229,57				
13,97	267,27				
15,97	306,52				
15,02	288,39				
12,97	248,32				
10,97	208,64				
8,96	168,75				
6,95	129,23				
5,01	92,09				
0,0183 [m/s]			standard deviation		[m/s]
0,999978			correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	71,91 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	150,38 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	228,86 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	307,34 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,67 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,22 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,18 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,08 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,412 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	8,490 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	16,645 [m/s]

**Remarks**

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



report of

**turbulente Anströmung von ca. 6%**

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

anemometer manufacturer:	Vector
type:	A100L2
serial number:	WTGMT501
converter:	-

Customer:		
date:	11.04.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

**optional: second calibration**

date of calibration:	11.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1014,853846 hPa
air temperature:	23,4 °C
humidity:	39,7 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemonometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

**first**

**second**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,019 [m/s]+ 0,05221 [m/s]/[Hz]*frequency$	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,07	80,16			
6,11	115,27			
8,06	151,18			
10,09	190,95			
12,08	230,88			
14,04	269,23			
15,93	306,68			
14,92	286,52			
12,96	247,75			
11,03	210,36			
8,96	168,50			
6,97	132,84			
4,99	98,86			
0,1032 [m/s]			standard deviation	
0,999287		correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	76,26 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	152,88 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	229,50 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	306,11 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,13 [m/s]= 3,23 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,15 [m/s]= 1,86 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,00 [m/s]= 0,03 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,10 [m/s]= 0,66 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,195 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	8,372 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	16,725 [m/s]

**Remarks**

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



### METEK USA1

report of

#### Normalanströmung

anemometer manufacturer:	METEK
type:	Ultraschall
serial number:	USA1
converter:	-

#### FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

Customer:		
date:	01.02.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

#### first calibration:

date of calibration:	01.02.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1021,6 hPa
air temperature:	23,0 °C
humidity:	- %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

#### optional: second calibration

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

### Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemonometern für den Einsatz an Windkraftanlagen

first

second

flow speed [m/s]	speed [m/s]	<p>regression line (4 to 16 m/s):</p> $V[m/s]= 0,260 [m/s]+ 0,98439 [m/s]/[Hz]*frequency$	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,07	3,99			
6,11	5,86			
8,14	7,99			
10,14	10,06			
12,09	12,05			
14,05	14,06			
15,91	15,90			
14,97	14,90			
13,05	13,02			
11,03	10,96			
9,12	8,98			
7,18	6,88			
4,99	4,85			
0,0647 [m/s]		standard deviation		[m/s]
0,999718		correlation coefficient <sup>2</sup>		

speed at 4.0 [m/s]	3,80 [m/s]
speed at 8.0 [m/s]	7,86 [m/s]
speed at 12.0 [m/s]	11,93 [m/s]
speed at 16.0 [m/s]	15,99 [m/s]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,12 [m/s]= 2,9 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,2 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,2 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,00 [m/s]= 0,0 %

wind speed at 5,0 [m/s]	5,182 [m/s]
wind speed at 10,0 [m/s]	10,104 [m/s]
wind speed at 15,0 [m/s]	15,026 [m/s]

Remarks

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



report of  
turbulente Anströmung von ca. 6%

anemometer manufacturer:	METEC
type:	Ultraschall
serial number:	USA1
converter:	-

FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

Customer:		
date:	01.02.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

first calibration:

date of calibration:	01.02.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1015,1 hPa
air temperature:	21,5 °C
humidity:	- %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen

first		regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s] = -0,001 [m/s] + 0,99168 [m/s]/[Hz] * frequency$	second		
flow speed [m/s]	speed [m/s]		flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	
4,07	4,06				
6,04	6,06				
8,05	8,07				
10,07	10,15				
11,86	11,93				
13,91	14,10				
15,86	15,98				
15,13	15,26				
12,93	13,00				
10,89	11,00				
8,95	9,06				
7,07	7,14				
4,83	4,96				
0,0434 [m/s]			standard deviation		[m/s]
0,999874		correlation coefficient <sup>2</sup>			

speed at 4.0 [m/s]	4,03 [m/s]
speed at 8.0 [m/s]	8,07 [m/s]
speed at 12.0 [m/s]	12,10 [m/s]
speed at 16.0 [m/s]	16,14 [m/s]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,05 [m/s]= 1,1 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,04 [m/s]= 0,5 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,04 [m/s]= 0,3 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,1 %

wind speed at 5,0 [m/s]	4,957 [m/s]
wind speed at 10,0 [m/s]	9,916 [m/s]
wind speed at 15,0 [m/s]	14,874 [m/s]

Remarks

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



# Thies 4.3303.22.00 WTGMT282

report of

## Normalanströmung

anemometer manufacturer:	Thies / Windtest
type:	4.3303.22.000
serial number:	WTGMT282
converter:	-

## FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

Customer:		Unterschrift
date:	11.04.01	
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

### first calibration:

date of calibration:	11.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1010,3 hPa
air temperature:	21,4 °C
humidity:	42,4 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

### optional: second calibration

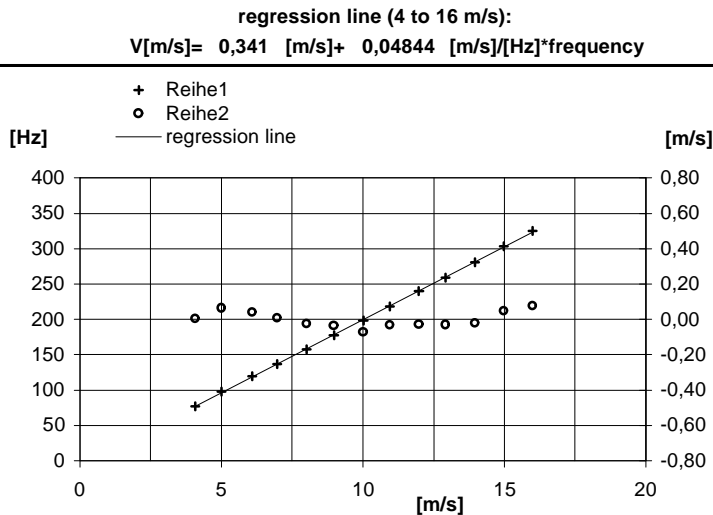
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in in the diploma thesis

## Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemonometern für den Einsatz an Windkraftanlagen

### first

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,09	77,43
6,09	119,50
8,00	157,64
10,01	198,18
11,99	239,83
13,96	280,73
15,99	324,65
14,98	303,27
12,93	259,35
10,95	218,27
8,97	177,41
6,97	137,00
5,01	97,73
0,0447 [m/s]	standard deviation
0,999866	correlation coefficient <sup>2</sup>



### second

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
	[m/s]

frequency at 4.0 [m/s]	75,54 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	158,12 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	240,69 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	323,27 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,00 [m/s]= 0,12 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,32 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,23 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,08 [m/s]= 0,47 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,216 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	8,091 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	15,841 [m/s]

**Remarks**

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)





report of

**Schräganströmung von ca. 10°**

anemometer manufacturer:	Thies / Windtest
type:	4.3303.22.000
serial number:	WGTMT282
converter:	-

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

Customer:

date:	10.04.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	10.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1011,7 hPa
air temperature:	22,5 °C
humidity:	40,6 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

first		regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,641 [m/s]+ 0,04807 [m/s]/[Hz]*frequency$	second		
flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]		flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	
4,05	71,70				
5,97	110,57				
7,97	151,95				
9,97	194,18				
12,00	236,39				
13,99	276,66				
15,98	320,20				
14,98	298,73				
12,98	256,14				
10,96	213,89				
8,94	172,48				
6,97	132,47				
4,97	89,95				
0,0324 [m/s]			standard deviation		[m/s]
0,99993			correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	69,88 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	153,09 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	236,31 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	319,52 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,04 [m/s]= 0,99 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,36 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,06 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,06 [m/s]= 0,35 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,486 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	8,332 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	16,023 [m/s]

**Remarks**

--

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)
---



report of  
turbulente Anströmung von ca. 6%

FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

anemometer manufacturer:	Thies / Windtest
type:	4.3303.22.000
serial number:	WTGMT282
converter:	-

Customer:		
date:	10.04.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

first calibration:

date of calibration:	10.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1011,0 hPa
air temperature:	22,7 °C
humidity:	42,1 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen

first		regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,696 [m/s]+ 0,04482 [m/s]/[Hz]*frequency$	second	
flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]		flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,06	73,91			
6,08	117,77			
7,93	161,95			
10,07	208,64			
12,02	251,89			
13,95	296,95			
15,94	340,56			
15,05	320,34			
13,03	274,98			
11,07	230,27			
8,95	183,50			
6,95	138,68			
4,99	100,68			
0,0778 [m/s]			standard deviation	
0,9996		correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	73,71 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	162,95 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	252,19 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	341,44 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,05 [m/s]= 1,31 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,29 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,27 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,15 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,282 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	7,868 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	15,039 [m/s]

Remarks

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



### Thies 4.3303.22.00 WTGMT280

report of

#### Normalanströmung

anemometer manufacturer:	Thies / Windtest
type:	4.3303.22.000
serial number:	WTGMT280
converter:	-

#### FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

Customer:		
date:	19.03.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

#### first calibration:

date of calibration:	19.03.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1009,8 hPa
air temperature:	22,6 °C
humidity:	32,8 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

#### optional: second calibration

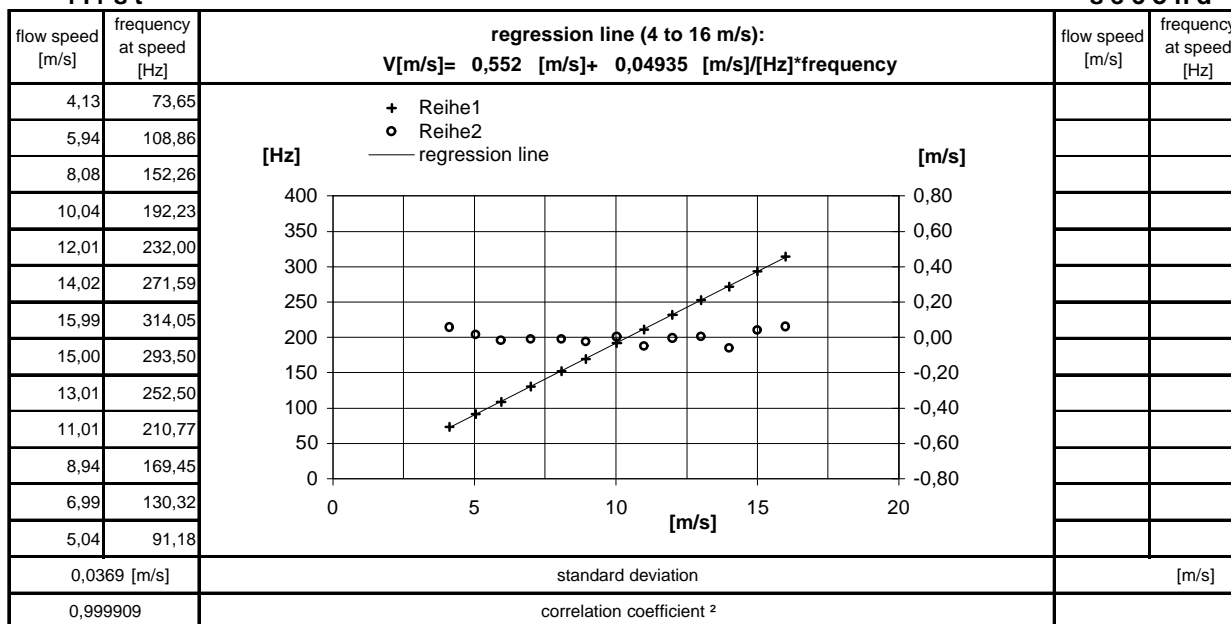
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in in the diploma thesis

### Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen

first

second



frequency at 4.0 [m/s]	69,86 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	150,91 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	231,95 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	313,00 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,06 [m/s]= 1,38 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,14 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,00 [m/s]= 0,04 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,06 [m/s]= 0,38 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,501 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	8,449 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	16,345 [m/s]

Remarks

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



report of

**Schräganströmung von ca. 10°**

anemometer manufacturer:	Thies / Windtest
type:	4.3303.22.000
serial number:	WTGMT280
converter:	-

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

Customer:

date:	20.03.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	20.03.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1009,7 hPa
air temperature:	22,5 °C
humidity:	25,8 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

first		regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,390 [m/s]+ 0,04988 [m/s]/[Hz]*frequency$	second	
flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]		flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
3,82	70,43			
5,96	111,77			
7,99	152,14			
10,03	192,16			
12,01	232,45			
13,96	270,86			
16,04	315,75			
15,00	293,65			
12,98	252,09			
10,96	211,70			
8,98	171,30			
6,98	131,70			
5,02	93,09			
0,0475 [m/s]			standard deviation	
0,999853		correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	72,36 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	152,55 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	232,74 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	312,93 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,08 [m/s]= 2,12 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,19 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,19 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,10 [m/s]= 0,6 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,381 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	8,371 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	16,353 [m/s]

**Remarks**

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



report of  
turbulente Anströmung von ca. 6%

FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

anemometer manufacturer:	Thies / Windtest
type:	4.3303.22.000
serial number:	WTGMT280
converter:	-

Customer:		
date:	20.03.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

first calibration:

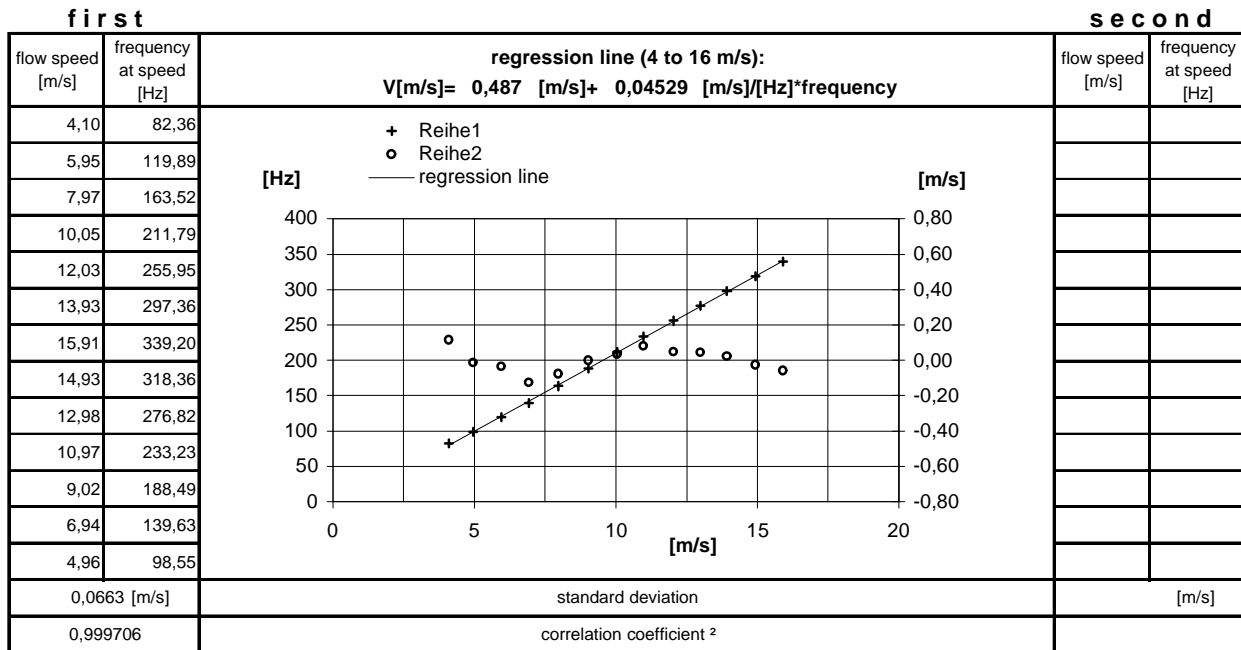
date of calibration:	20.03.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1011,1 hPa
air temperature:	23,6 °C
humidity:	25,8 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen



frequency at 4.0 [m/s]	77,57 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	165,90 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	254,22 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	342,54 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,11 [m/s]= 2,79 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,08 [m/s]= 0,97 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,05 [m/s]= 0,39 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,06 [m/s]= 0,37 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,110 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	7,733 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	14,979 [m/s]

Remarks

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



# Thies 4.3336.21.000

report of

## Normalanströmung

anemometer manufacturer:	Thies / Weber
type:	4.3336.21.000
serial number:	-
converter:	-

## FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

Customer:		Unterschrift
date:	23.03.01	
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

### first calibration:

date of calibration:	23.03.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	993,1384615 hPa
air temperature:	23,0 °C
humidity:	40,3 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

### optional: second calibration

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

## Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemonometern für den Einsatz an Windkraftanlagen

first

second

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,632 [m/s]+ 0,04719 [m/s]/[Hz]*frequency$	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	
3,99	74,25				
6,00	113,41				
7,97	154,05				
9,98	196,80				
11,97	238,09				
13,94	283,16				
16,06	327,93				
14,97	306,09				
13,04	263,84				
11,00	217,25				
8,99	175,52				
7,07	135,86				
5,01	93,86				
0,0822 [m/s]			standard deviation		[m/s]
0,999555			correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	71,36 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	156,11 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	240,87 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	325,63 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,15 [m/s]= 3,76 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,06 [m/s]= 0,8 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,11 [m/s]= 0,88 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,05 [m/s]= 0,31 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,408 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	8,183 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	15,734 [m/s]

### Remarks

--

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)
---



report of

**Schräganströmung von ca. 10°**

anemometer manufacturer:	Thies / Weber
type:	4.3336.21.000
serial number:	-
converter:	-

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

Customer:

date:	23.03.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	23.03.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	992,9230769 hPa
air temperature:	22,6 °C
humidity:	40,3 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

first		regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,615 [m/s]+ 0,04781 [m/s]/[Hz]*frequency$	second		
flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]		flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	
4,01	72,02				
6,03	113,02				
7,93	153,02				
10,08	198,27				
11,98	237,63				
13,98	278,43				
16,01	322,79				
15,04	302,86				
13,00	258,48				
10,99	216,57				
8,97	174,25				
7,08	134,91				
5,09	93,48				
0,0301 [m/s]			standard deviation		[m/s]
0,99994		correlation coefficient <sup>2</sup>			

frequency at 4.0 [m/s]	70,80 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	154,47 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	238,14 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	321,80 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,05 [m/s]= 1,27 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,00 [m/s]= 0,03 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,06 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,22 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,440 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	8,265 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	15,914 [m/s]

**Remarks**

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



report of  
turbulente Anströmung von ca. 6%

anemometer manufacturer:	Thies / Weber
type:	4.3336.21.000
serial number:	-
converter:	-

FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

Customer:		
date:	23.03.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

first calibration:

date of calibration:	23.03.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	993,1692308 hPa
air temperature:	22,9 °C
humidity:	40,1 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen

first		regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,546 [m/s]+ 0,0454 [m/s]/[Hz]*frequency$	second		
flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]		flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	
4,07	81,09				
5,98	119,16				
7,95	162,11				
10,07	209,93				
12,07	254,52				
14,00	296,41				
15,92	340,02				
14,98	317,47				
13,03	275,00				
10,96	229,30				
9,10	189,27				
7,00	137,05				
5,03	100,05				
0,0863 [m/s]			standard deviation		[m/s]
0,999504		correlation coefficient <sup>2</sup>			

frequency at 4.0 [m/s]	76,08 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	164,20 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	252,31 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	340,43 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,15 [m/s]= 3,78 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,05 [m/s]= 0,61 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,22 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,07 [m/s]= 0,41 %

wind speed at 80,0 [Hz]	4,178 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	7,809 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	15,073 [m/s]

Remarks

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)







report of

**Schräganströmung von ca. 10°**

anemometer manufacturer:	Friedrichs / Windtest
type:	4033.1100
serial number:	WTGMT156
converter:	-

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

Customer:		
date:	21.03.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	21.03.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	993,4307692 hPa
air temperature:	22,2 °C
humidity:	30,3 %
position factor:	-
calibration P Pra, IFS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IFS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

**first**

**second**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,503 [m/s]+ 0,09428 [m/s]/[Hz]*frequency$	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
3,86	36,77			
6,04	58,52			
8,06	79,77			
10,01	100,23			
11,94	120,89			
13,96	143,00			
16,02	164,89			
15,03	154,70			
13,05	133,34			
10,97	110,64			
9,09	90,52			
7,08	69,43			
5,07	48,68			
0,0486 [m/s]			standard deviation	
0,999844		correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	37,09 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	79,52 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	121,95 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	164,37 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,11 [m/s]= 2,83 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,04 [m/s]= 0,46 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,04 [m/s]= 0,32 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,17 %

wind speed at 80,0 [Hz]	8,045 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	15,588 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	30,673 [m/s]

**Remarks**

--

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)
---



report of

**turbulente Anströmung von ca. 6%**

**WINDTEST KWK GmbH**

anemometer manufacturer:	Friedrichs / Windtest
type:	4033.1100
serial number:	WTGMT156
converter:	-

Customer:		
date:	22.03.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	22.03.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	987,7230769 hPa
air temperature:	23,7 °C
humidity:	40,7 %
position factor:	-
calibration P Pra, IFS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IFS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

**first**

**second**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,799 [m/s]+ 0,0873 [m/s]/[Hz]*\text{frequency}$	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,04	37,91			
6,02	59,16			
7,94	81,65			
9,97	105,63			
12,09	129,27			
14,06	152,05			
15,99	174,20			
14,95	162,00			
12,99	139,66			
11,04	117,11			
9,05	94,61			
6,94	69,14			
4,90	47,64			
0,0465 [m/s]			standard deviation	
0,999858		correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	36,67 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	82,49 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	128,31 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	174,13 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,07 [m/s]= 1,69 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,14 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,05 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,13 %

wind speed at 80,0 [Hz]	7,782 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	14,766 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	28,734 [m/s]

**Remarks**

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



**Friedrichs 4033.1100 WTGMT 080/6**

report of

**Normalanströmung**

anemometer manufacturer:	Friedrichs / Windtest
type:	40331100
serial number:	WTGMT080/6
converter:	-

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

Customer:		
date:	11.04.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

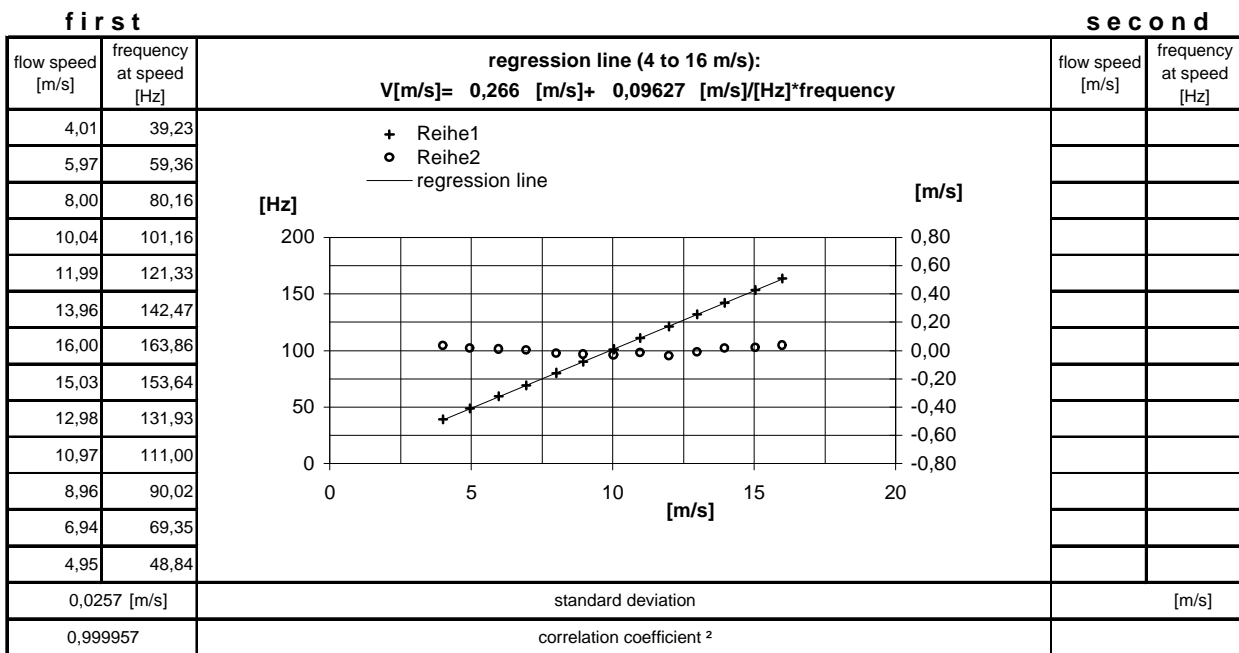
date of calibration:	11.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1012,923077 hPa
air temperature:	22,3 °C
humidity:	40,7 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
position factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**



frequency at 4.0 [m/s]	38,79 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	80,34 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	121,89 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	163,44 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,04 [m/s]= 0,87 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,25 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,04 [m/s]= 0,33 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,04 [m/s]= 0,24 %

wind speed at 80,0 [Hz]	7,967 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	15,669 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	31,072 [m/s]

**Remarks**

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



report of  
**Schräganströmung von ca. 10°**

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

anemometer manufacturer:	Friedrichs / Windtest
type:	40331100
serial number:	WGTMT080/6
converter:	-

Customer:		
date:	11.04.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	11.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1014,292308 hPa
air temperature:	22,4 °C
humidity:	39,1 %
position factor:	-
calibration P Pra, IFS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IFS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

**first**

**second**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,674 [m/s]+ 0,09242 [m/s]/[Hz]*frequency	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
3,96	35,75			
6,03	58,07			
7,95	78,61			
10,03	101,07			
12,01	122,52			
14,00	144,34			
16,01	166,09			
15,01	155,39			
13,02	133,50			
10,96	111,14			
8,94	89,02			
6,95	67,84			
4,94	46,45			
0,0193 [m/s]		standard deviation		[m/s]
0,999976		correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	35,99 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	79,27 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	122,55 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	165,83 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,52 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,19 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,01 [m/s]= 0,11 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,1 %

wind speed at 80,0 [Hz]	8,068 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	15,461 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	30,248 [m/s]

**Remarks**

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



report of

**turbulente Anströmung von ca. 6%**

anemometer manufacturer:	Friedrichs / Windtest
type:	40331100
serial number:	WGTMT080/6
converter:	-

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

Customer:		Unterschrift
date:	11.04.01	
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	11.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1013,284615 hPa
air temperature:	23,4 °C
humidity:	40,7 %
position factor:	-
calibration P Pra, IFS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IFS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

**first**

**second**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,484 [m/s]+ 0,08933 [m/s]/[Hz]*frequency$	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,02	43,61			
5,99	62,16			
8,01	80,33			
9,99	104,70			
12,01	128,50			
13,94	152,23			
16,05	175,59			
15,01	164,23			
13,06	141,68			
10,99	116,09			
8,94	91,82			
6,95	70,00			
5,00	53,51			
0,2128 [m/s]			standard deviation	
0,997037		correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	39,36 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	84,14 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	128,91 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	173,69 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,36 [m/s]= 8,96 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,35 [m/s]= 4,43 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,04 [m/s]= 0,37 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,12 [m/s]= 0,72 %

wind speed at 80,0 [Hz]	7,630 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	14,777 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	29,071 [m/s]

**Remarks**

--

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)
---



# MetOne EW0100016/Y1165

report of

## Normalanströmung

anemometer manufacturer:	MetOne
type:	Schalenkreuz (Kegelig)
serial number:	EW0100016 / Y1165
converter:	-

## FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

Customer:		
date:	10.04.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

### first calibration:

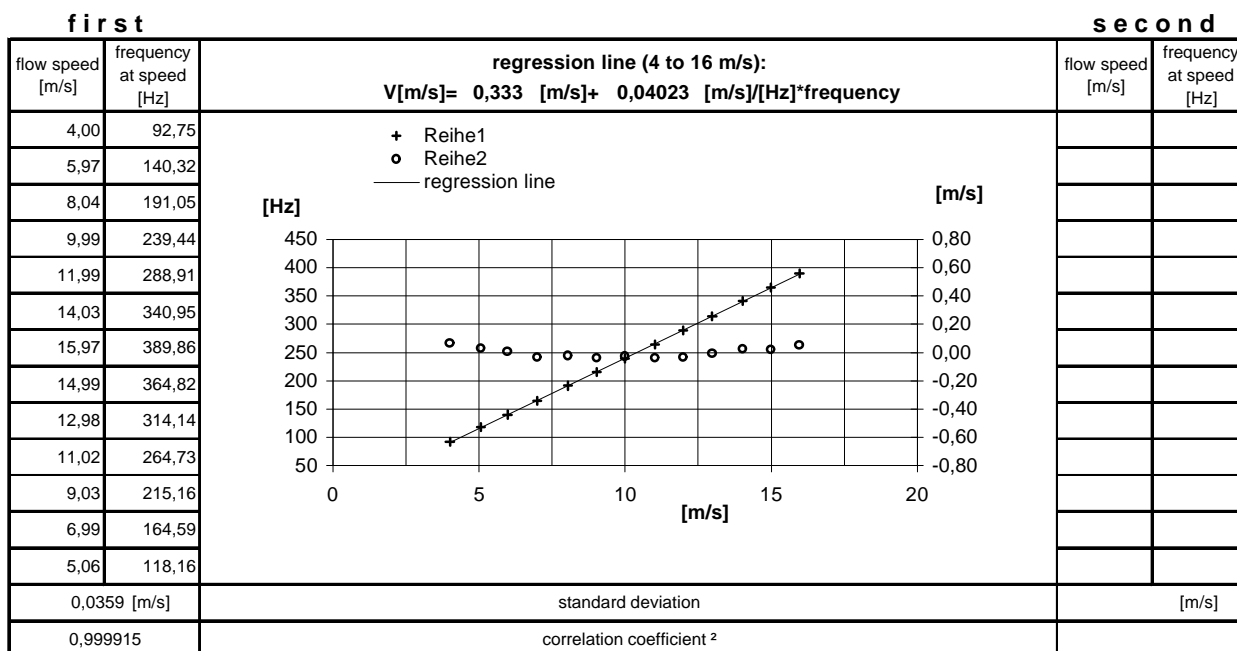
date of calibration:	10.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1002,461538 hPa
air temperature:	21,8 °C
humidity:	43,1 %
position factor:	-
calibration P Pra, IFS:	-
software version:	-

### optional: second calibration

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IFS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

## Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen



frequency at 4.0 [m/s]	91,15 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	190,56 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	289,98 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	389,40 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,07 [m/s]= 1,63 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,29 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,28 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,05 [m/s]= 0,32 %

wind speed at 80,0 [Hz]	3,552 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	6,770 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	13,208 [m/s]

Remarks

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



report of

Schräganströmung von ca. 10°

anemometer manufacturer:	MetOne
type:	Schalenkreuz (Kegelrig)
serial number:	EW0100016 / Y1165
converter:	-

FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

Customer:		
date:	10.04.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

first calibration:

date of calibration:	10.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1003,215385 hPa
air temperature:	22,4 °C
humidity:	39,9 %
position factor:	-
calibration P Pra, IFS:	-
software version:	-

optional: second calibration

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IFS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in in the diploma thesis

Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen

first

second

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s]= 0,295 [m/s]+ 0,04006 [m/s]/[Hz]*frequency$	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
3,97	93,43			
5,98	141,72			
8,05	193,23			
10,00	241,36			
11,97	290,32			
13,98	342,43			
16,02	393,32			
15,01	368,23			
13,00	317,33			
11,02	266,82			
9,01	216,66			
7,00	166,86			
5,04	118,91			
0,0368 [m/s]			standard deviation	
0,999911		correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	92,48 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	192,33 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	292,17 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	392,01 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,07 [m/s]= 1,81 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,02 [m/s]= 0,22 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,05 [m/s]= 0,4 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,03 [m/s]= 0,22 %

wind speed at 80,0 [Hz]	3,500 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	6,705 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	13,115 [m/s]

Remarks

--

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)
---





report of

**turbulente Anströmung von ca. 6%**

anemometer manufacturer:	MetOne
type:	Schalenkreuz (Kegelig)
serial number:	EW0100016 / Y1165
converter:	-

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

Customer:

date:	10.04.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	10.04.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1002,461538 hPa
air temperature:	23,2 °C
humidity:	42,0 %
position factor:	-
calibration P Pra, IFS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
position factor:	
calibration P Pra, IFS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

**first**

**second**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,833 [m/s]+ 0,03803 [m/s]/[Hz]*frequency	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
3,94	86,91			
6,05	136,41			
8,03	183,20			
10,07	240,86			
11,91	289,30			
14,08	349,39			
15,97	403,43			
14,88	374,93			
12,94	312,81			
11,00	264,74			
8,99	212,16			
6,98	157,91			
5,02	117,77			
0,1732 [m/s]			standard deviation	
0,998001		correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	83,28 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	188,46 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	293,64 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	398,82 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,20 [m/s]= 5,04 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,23 [m/s]= 2,86 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,08 [m/s]= 0,66 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,20 [m/s]= 1,28 %

wind speed at 80,0 [Hz]	3,875 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	6,918 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	13,002 [m/s]

**Remarks**

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)



**Conrad**

report of

**Normalanströmung**

anemometer manufacturer:	Conrad / Weber
type:	Schalenkreuz
serial number:	-
converter:	-

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

Customer:		
date:	26.03.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

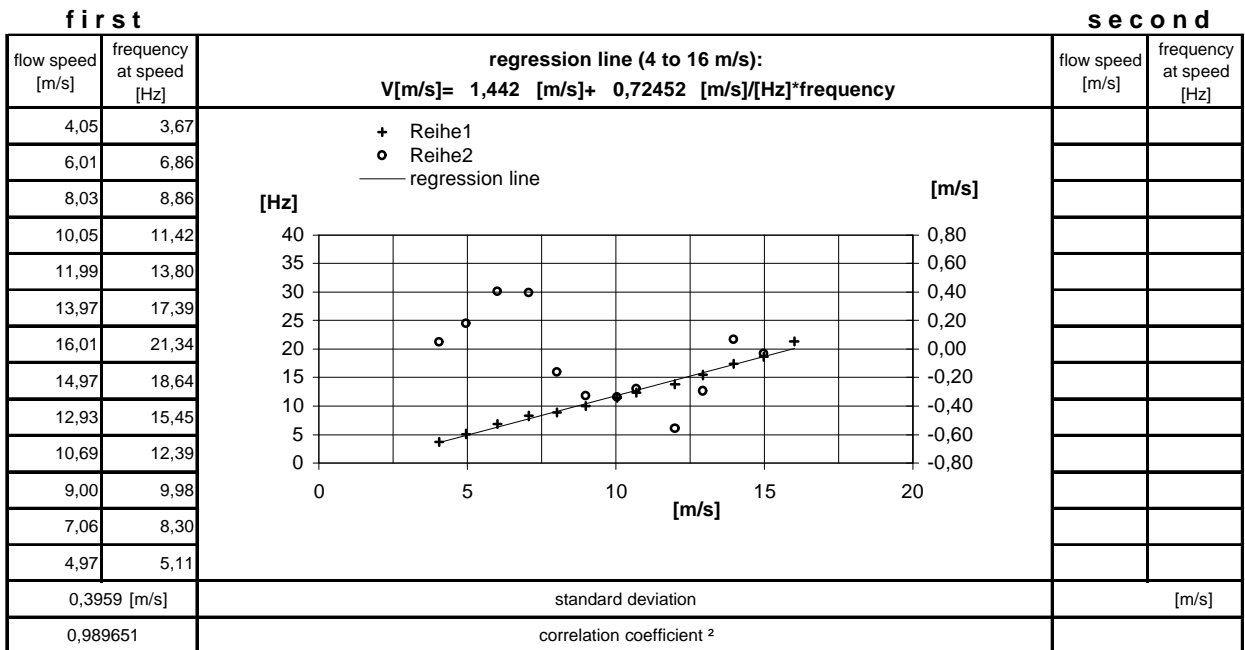
date of calibration:	26.03.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1005,938462 hPa
air temperature:	21,5 °C
humidity:	27,7 %
position factor:	-
calibration P Pra, IFS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
position factor:	
calibration P Pra, IFS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemonometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**



frequency at 4.0 [m/s]	3,53 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	9,05 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	14,57 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	20,09 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,05 [m/s]= 1,24 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,16 [m/s]= 2,03 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,56 [m/s]= 4,63 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,90 [m/s]= 5,6 %

wind speed at 80,0 [Hz]	59,404 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	117,37 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	233,29 [m/s]

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)





report of

**turbulente Anströmung von ca. 6%**

anemometer manufacturer:	Conrad / Weber
type:	Schalenkreuz
serial number:	-
converter:	-

**FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF**

Customer:

date:	27.03.01	Unterschrift
in charge:	Deiss, Lackmann	
checked:	Deiss, Lackmann	

**first calibration:**

date of calibration:	27.03.01
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb
air pressure:	1008,430769 hPa
air temperature:	21,7 °C
humidity:	26,5 %
position factor:	-
calibration P Pra, IFS:	-
software version:	-

**optional: second calibration**

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
position factor:	
calibration P Pra, IFS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

**first**

**second**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): $V[m/s] = 0,917 [m/s] + 0,93186 [m/s]/[Hz] \cdot \text{frequency}$	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,03	3,77	<p>+ Reihe1 o Reihe2 — regression line</p>		
6,05	5,41			
7,93	7,23			
9,93	9,84			
12,07	12,07			
13,93	13,98			
16,07	16,35			
15,04	15,09			
12,98	13,00			
11,01	10,89			
9,00	8,43			
6,93	6,27			
4,95	4,30			
0,1774 [m/s]		standard deviation		[m/s]
0,997947		correlation coefficient <sup>2</sup>		

frequency at 4.0 [m/s]	3,31 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	7,60 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	11,89 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	16,19 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,41 [m/s]= 10,1 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,27 [m/s]= 3,46 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,09 [m/s]= 0,78 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,08 [m/s]= 0,49 %

wind speed at 80,0 [Hz]	75,466 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	150,01 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	299,11 [m/s]

**Remarks**

--

Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)
---