Fachhochschule Düsseldorf

Fachbereich
Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Institut für Strömungsmaschinen

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 Juni 2001

FH D
Fachhochschule Düsseldorf

FH Düsseldorf, FB04, IFS, Josef-Gockeln-Str. 9, D-40474 Düsseldorf

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.

Danksagung

Diese Diplomarbeit entstand am Institut für Strömungsmaschinen an der Fachhochschule Düsseldorf in Zusammenarbeit mit der Firma WINDTEST Grevenbroich GmbH.

Unser Dank richtet sich an Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier für die Gespräche und Ratschläge während der Erstellung der Diplomarbeit. Auch bei den Mitarbeitern des Institutes danken wir für die nette Hilfestellung.

Für die schöne Zeit bei der Firma WINDTEST möchten wir uns bei der gesamten Belegschaft bedanken. Insbesondere für die kollegiale Zusammenarbeit danken wir Herrn Dipl.-Ing. Christoph Hilling.

Unseren Familien, Freunden und Partnern danken wir für die Unterstützung und die aufgebrachte Geduld während der gesamten Studienzeit.

Düsseldorf, im Juni 2001

EINLEITUNG **1**

1 METHODEN DER WINDGESCHWINDIGKEITSMESSUNG **3**

1.1 MECHANISCHE STRÖMUNGSMESSUNG 3
1.1.1 Drucksonden 3
1.1.1.1 Staudrucksonde: Prandtlsches Staurohr 3
1.1.1.2 Mehrlochsonden 5
1.1.2 Schalenkreuzanemometer 7
1.2 THERMISCHE STRÖMUNGSMESSUNG 10
1.2.1 Hitzdrahtsonden 10
1.2.2 Heißfilmsonden 12
1.3 AKUSTISCHE STRÖMUNGSMESSUNG 14
1.3.1 Ultraschallanemometer 15
1.3.2 SODAR 18

2 PROBLEMATIK DER WINDGESCHWINDIGKEITSMESSUNG **23**

2.1 DER WIND IN BODENNÄHE 23
2.2 SCHWANKUNG DER MITTLEREN GESCHWINDIGKEIT TURBULENZDEFINITION 23
2.2.1 Berechnung des Turbulenzgrades 24
2.3 MESSUNG DER TURBULENTEN STRÖMUNG MIT DEM PRANDTLSCHEN STAUROHR 26

3 VORBEREITUNG ZUR PROFILVERMESSUNG **28**

3.1 PROGRAMMIERUNG DER SOFTWARE 29
3.2 POSITIONIERUNG DER MESSPUNKTE 30
3.3 MESSUNG MIT DER FIBERFILMSONDE 30
3.3.1 Aufnahme der Kalibrierkurve für die Fiberfilmsonde 30
3.3.2 Richtcharakteristik 33
3.3.3 Linearisierung des Signals 34
3.3.4 Grenzfrequenz der Fiberfilmsonde 35
3.3.5 Multimeter 36
3.3.6 Prüfung der Digitalmanometer 39

4 VERMESSUNG DES GESCHWINDIGKEITSPROFILS **41**

4.1 AUSWERTUNG UND VERGLEICH DER MESSDATEN 41
4.1.1 Vergleich des Gleichanteiles (Fiberfilm – Prandtlsches Staurohr) 41
4.1.2 Vergleich des Wechselanteiles (Fiberfilm – HP-Analysator) 42
4.2 VORGEHENSWEISE BEI DER VERMESSUNG 46
4.3 AUSWERTUNG DER MESSDATEN 46
4.3.1 Dreidimensionale Darstellung des Geschwindigkeitsprofils mit MATLAB 46
4.3.2 Auswertung der Turbulenz und der Geschwindigkeitsschwankung 49
4.4 QUERKOMPONENTENMESSUNG MIT DER 5-LOCH KEGELSONDE 53
4.5 VERMESSUNG DES KERNSTRAHLWINKELS 54

5 UMBAU DES WINDKANALS **56**

5.1 BESCHREIBUNG UND TECHNISCHE DATEN DES WINDKANALS 56
5.2 WINDKANALEINBAUTEN 57
5.2.1 Windkanaldüse 57
5.2.2 Beruhigungssiebe 57
5.2.3 Flies 57
5.2.4 Gleichrichter 57
5.3 OPTIMIERUNG 58

5.3.1 Veränderungen am Gleichrichter und den Sieben 58
5.3.2 Veränderungen an den Umlenkschaufeln 59
5.3.3 Veränderungen am Rotor und Stator 60

6 KALIBRIERUNG DER ANEMOMETER 62

6.1 DIE LEISTUNGSKURVE EINER WINDENERGIEANLAGE 63
6.2 VORGEHENSWEISE DER KALIBRIERUNG 64
6.3 EINFLUSS DER POSITION DES PRANDTLSCHEN STAUROHRES AUF DIE KALIBRIERUNG 66
6.4 NORMALANSTRÖMUNG UND SCHRÄGANSTRÖMUNG 67
6.4.1 Normalanströmung 68
6.4.2 Schräganströmung 68
6.4.3 Einfluss der Schrägstellung des Anemometers auf die Messergebnisse 69
6.4.4 Nachlaufverhalten der Anemometer 71
6.5 VARIATION DER TURBULENZ 72
6.6 BESCHREIBUNG DER ANEMOMETER UND GRAFISCHE DARSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE 73
6.6.1 Anemometer der Firma Adolf Thies GmbH & Co. KG 73
6.6.2 Anemometer der Firma Theodor Friedrichs & Co. 76
6.6.3 Anemometer der Firma R. M. Young Company 78
6.6.4 Anemometer der Firma Met One Instruments 79
6.6.5 Anemometer der Firma Vector Instruments 80
6.6.6 Anemometer der Firma Conrad Electronics GmbH 82
6.6.7 Anemometer der Firma METEK GmbH 83
6.7 ERGEBNISSE DER KALIBRIERUNG 84
6.8 ABWEICHUNG DER KALIBRIERKURVE BEI TURBULENTER ANSTRÖMUNG 86
6.8.1 Strömungswiderstand einer umströmten Kugel 86
6.8.2 Reynoldszahlen einer umströmten Kugel 88
6.8.3 Fazit 88
6.9 VERGLEICH DER KALIBRIERPROTOKOLLE 89

ZUSAMMENFASSUNG 90

VERMESSUNG DER GESCHWINDIGKEITSVERTEILUNG DES WINDKANALS 90
VERMESSUNG DES TURBULENZGRADES VOM WINDKANAL 90
KALIBRIERUNG DER ANEMOMETER 91

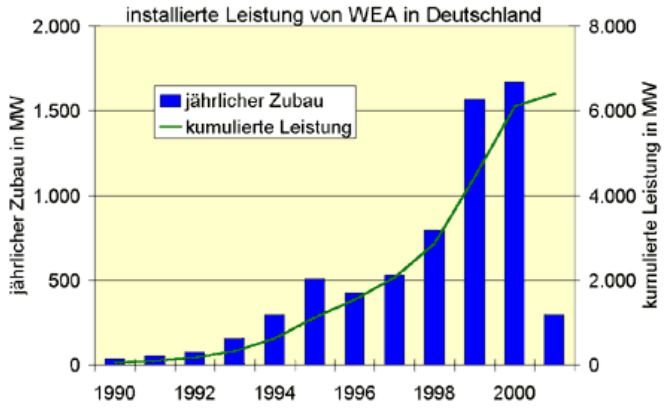
LITERATURVERZEICHNIS 92

SYMBOLVERZEICHNIS 96

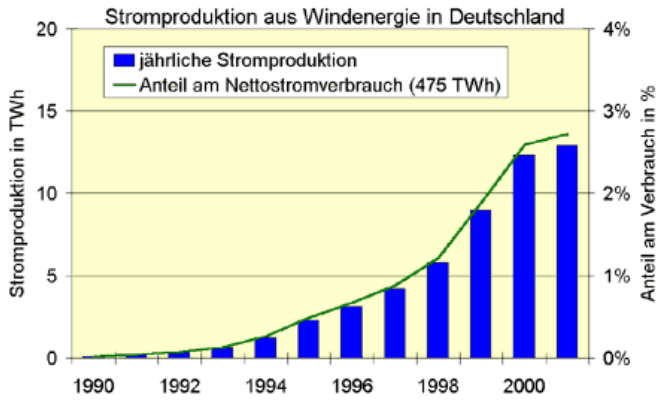
ANHANG

Einleitung

Die Nutzung erneuerbarer Energien[1] 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[2] 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) **[6]**.



a)



b)

Bild 0.1 a) Leistungszuwachs pro Jahr und installierte Gesamtleistung der WEA **b)** Gesamtstromproduktion pro Jahr und prozentualer Anteil der Windenergie **[6]**

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.

[1] Energiequellen, die ohne Einsatz fossiler Rohstoffe erschlossen und zur Senkung der CO_2-Emissionen gefördert werden

[2] 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 vorliegender 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. Firma WINDTEST hat sich auf die Prüfung und Vermessung unterschiedlicher Windenergieanlagen spezialisiert. Sie lieferte freundlicherweise einen großen Teil der untersuchten Anemometer. Auch Firma ENRON, Fachgebiet Umwelttechnik der FH Düsseldorf und Universität Bielefeld stellten einige Anemometer für diese Untersuchungen zur Verfügung.

1 Methoden der Windgeschwindigkeitsmessung

1.1 Mechanische Strömungsmessung

1.1.1 Drucksonden

Seit über 200 Jahren werden Drucksonden zur Geschwindigkeitsmessung in Fluiden benutzt. Grundlage dafür hat der Schweizer Mathematiker und Physiker D. Bernoulli[3] gelegt.

1.1.1.1 Staudrucksonde: Prandtlsches Staurohr

Weit verbreitet ist das Prandtlsche[4] Staurohr, das sowohl den Gesamtdruck an der Kopfspitze als auch den statischen Druck an der Zylinderwand des Messrohres aufnimmt und in zwei getrennte Röhrchen einem Differenzmesser zuführt (**Bild 1.1a**).

Messprinzip

Bei strömenden Medien lassen sich folgende Druckgrößen mit dem Staurohr bestimmen:

- Als statischer Druck $\mathbf{p_{st}}$ wird der Druck bezeichnet, den ein parallel zur Rohrwand strömendes Medium auf diese Wand ausübt. Durch eine geeignete Bohrung in der Rohrwand oder durch den ringförmigen Schlitz eines Staurohres kann er als absoluter Druck $\mathbf{p_{st}}$ oder als Druckdifferenz $\Delta p_{st} = p_b - p_{st}$ gegenüber dem barometrischem Druck $\mathbf{p_b}$ gemessen werden. Im **Bild 1.2** ist der Druckverlauf des statischen Druckes am Prandtlschen Staurohrs dargestellt.
- Als Gesamtdruck $\mathbf{p_g}$ wird der Druck bezeichnet, der an der Spitze eines Staurohres gemessen wird. Er kann als absoluter Druck $\mathbf{p_g}$ oder als Druckdifferenz zum barometrischem Druck gemessen werden $\Delta p_g = p_g - p_b$.
- Als dynamischer Druck $\mathbf{p_{dy}}$ wird die Differenz aus Gesamtdruck und statischem Druck bezeichnet, die gemäß Bernoullischer Gleichung **(1.1)** ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit darstellt.

Entlang der sogenannten Verzweigungsstromlinie, **Bild 1.1b**, wird die Bernoullische Gleichung **(1.1)** angesetzt. Berechnet werden soll die Anströmgeschwindigkeit $\mathbf{c_1}$. Die statische Druckbohrung **3** ist geometrisch so gewählt worden, dass $p_1 = p_3$ gilt:

[3] Daniel Bernoulli, Schweizer Wissenschaftler, * 8. 2. 1700 Groningen, † 17. 3. 1782 Basel

[4] Ludwig Prandtl, Physiker, * 4. 2. 1875 Freising, † 15. 8. 1953 Göttingen

$$\frac{c_1^2}{2}+\frac{p_1}{\rho}=\frac{c_2^2}{2}+\frac{p_2}{\rho} \qquad \textbf{(1.1)}$$

mit $c_2 = 0$ und $p_1 = p_3$ folgt $c_1 = \sqrt{2\cdot\frac{p_2 - p_3}{\rho}}$ oder $c_\infty = \sqrt{2\cdot\frac{p_g - p_{st}}{r}} = \sqrt{2\cdot\frac{p_{dy}}{r}}$ **(1.2)**

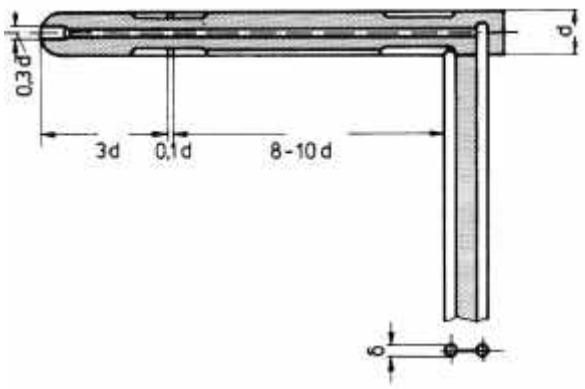


Bild 1.1a Geometrie des Prandtlschen Staurohres **[14]**

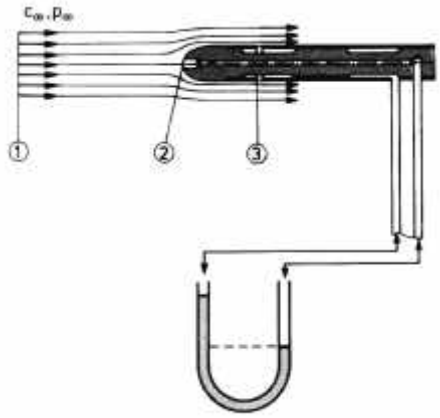


Bild 1.1b Schematische Darstellung der Verzweigungsstromlinie **[14]**

Die mit der Gleichung **(1.2)** berechnete Geschwindigkeit ist die Geschwindigkeit an der statischen Druckbohrung. Da die Strömung aufgrund der Prandtlrohrgeometrie beeinflusst wird, würde der statische Druck mit einem Fehler gemessen (**Bild 1.2**). Die Geometrie des Prandtlrohres mit dem senkrecht angebrachtem Halterohr ist aber so dimensioniert, dass der Einfluss durch die Stromaufwirkung des Halterohres kompensiert wird **[14]**.

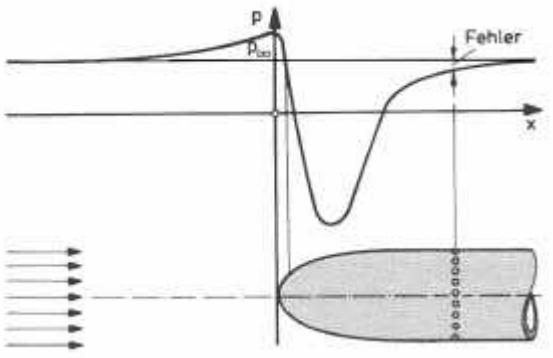


Bild 1.2 Druckverlauf des statischen Druckes am Prandtlschen Staurohrs **[14]**

1.1.1.2 Mehrlochsonden

Zur Messung räumlicher Strömungsfelder dienen Mehrlochsonden mit räumlich verteilten Messbohrungen, z. B. Kugelsonden mit fünf Messbohrungen auf zwei zueinander senkrechten Meridianen[5] (**Bild 1.4a**). Die Verteilung der Messbohrungen richtet sich nach den Strömungs- und Druckverhältnissen, die an einer umströmten Kugel über einen großen Reynoldszahlbereich bekannt sind.

Die Kugelsonden können trotz sorgfältiger Kalibrierung erhebliche Messfehler aufweisen. Das betrifft vor allem Messungen in Feldern, wo große Geschwindigkeitsgradienten existieren, z. B. in Randzonen oder Grenzschichten. Der Fehler erklärt sich aus der Entfernung der Bohrungen auf der Kugeloberfläche. Sie sollte möglichst klein sein. Die Verkleinerung der Kugelsonde hat jedoch Grenzen. Je kleiner der Durchmesser, um so schwieriger ist die Herstellung und Positionierung der Minibohrungen. Einfacher herzustellen sind dagegen Mehrlochsonden mit Halbkugelkopf oder Kegelkopf nach den **Bildern 1.3a** und **b**. Einige Sonden haben zusätzliche Bohrungen für den statischen Druck **[2]**.

a) Halbkugelkopfsonde **b)** Kegelkopfsonde

Bild 1.3 Sondenköpfe für dreidimensionale Geschwindigkeitsmessung [Fiedler]

Messprinzip

Für die Messung der Geschwindigkeitskomponenten quer zur Hauptströmungsrichtung wurde eine Fünflochkegelsonde (**Bild 1.4a**) mit einem zusätzlichen Anschluss für die Bestimmung des statischen Druckes verwendet. Mit dem statischen Druck $\mathbf{p_{st}}$ und dem Gesamtdruck $\mathbf{p_g}$ lässt sich der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit **c** bestimmen **(1.2)**.

Für die Bestimmung der drei Geschwindigkeitskomponenten $\mathbf{c_x}$, $\mathbf{c_y}$ und $\mathbf{c_z}$ wurde eine Kalibrierkurve wie im **Bild 1.4b** aufgenommen. Dafür wurde die Sonde in die Kalibriereinheit der Firma DISA (**Bild 3.5**) eingespannt. Die Drücke $\mathbf{p_1}$ bis $\mathbf{p_5}$ wurden unter den definierten Scherwinkeln **a** und Kippwinkeln **d** aufgenommen.

[5] Meridian: Längenkreis; verläuft durch die Pole der Kugel

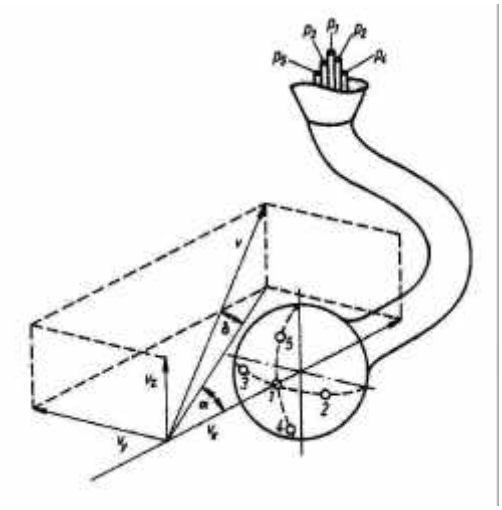


Bild 1.4a Fünflochkugelsonde zur Messung räumlicher Strömungsfelder **[2]**

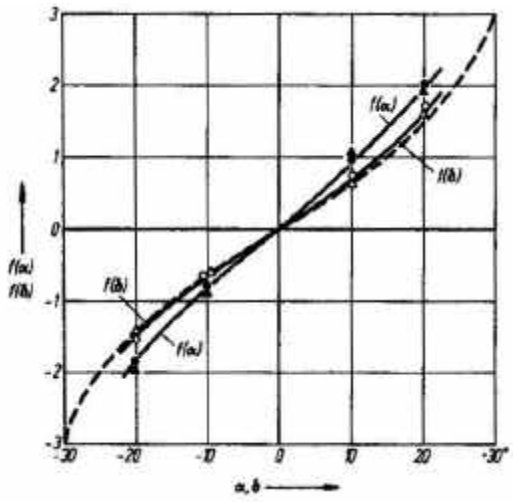


Bild 1.4b Kalibrierkurven einer Fünflochkugelsonde **[2]**

Der Funktionswert **f(a)** wurde unter der Voraussetzung, dass $p_4 = p_5$ (d.h. der Kippwinkel d ist gleich null) berechnet. Analog dazu wurde der Funktionswert **f(d)** unter der Voraussetzung, dass $p_2 = p_3$ (der Scherwinkel a ist gleich null) mit den Gleichungen **(1.3)** bestimmt.

$$f(\alpha) = \frac{p_2 - p_3}{2 \cdot p_1 - p_2 - p_3} \qquad f(\delta) = \frac{p_4 - p_5}{2 \cdot p_1 - p_4 - p_5} \qquad \textbf{(1.3)}$$

Für die Bestimmung der Querkomponenten werden Drücke an allen Druckanschlüssen abgegriffen und dafür die Funktionswerte nach den Gleichungen **(1.3)** ausgerechnet. Mit Hilfe dieser Werte werden aus der Kalibrierkurve bzw. dem Kalibrierpolynom die Winkel a und d abgelesen bzw. berechnet. Dann lassen sich aus dem Betrag der Geschwindigkeit **c** und den beiden Winkel a und d die Geschwindigkeits-komponenten c_x, c_y und c_z nach den Gleichungen **(1.4)** ermitteln **[2]**.

$$c_x = c \cdot \cos\delta \cdot \cos\alpha \qquad c_y = c \cdot \cos\delta \cdot \sin\alpha \qquad c_z = c \cdot \sin\delta \qquad \textbf{[2]} \qquad \textbf{(1.4)}$$

Vor- und Nachteile der Drucksonden

Pneumatische Sonden gehören zur Standardausrüstung für aerodynamische Messungen. Sie haben sich über Jahrzehnte bewährt und sind in der Strömungsgeschwindigkeitsmesstechnik weit verbreitet und gut bekannt.

Vorteile

- einfacher Aufbau, robuste Handhabung und nahezu wartungsfrei,
- universelle Anwendbarkeit bezüglich Strömungsgeschwindigkeit (anwendbar bis in den Überschallbereich),
- hohe Zuverlässigkeit und Messgenauigkeit bis zu 0,1% vom Messwert.

Nachteile

- arbeiten nicht eingriffsfrei (Feldstörungen),
- liefern nur einen geringen dynamischen Druck, der genau gemessen werden muss,
- geben nichtlinearen Zusammenhang zwischen Druck und Geschwindigkeit,
- haben bei engen Anschlussleitungen und kleinen Druckdifferenzen hohe Zeitkonstanten (schränkt Anwendung auf pulsierende Strömungen ein),
- Dichteschwankungen erhöhen den Messfehler **[2]**.

Anwendungsgebiete der Drucksonden

Drucksonden sind auch für den Einsatz unter rauen Betriebsbedingungen geeignet, da weder bewegliche noch verschleißanfällige Teile der Strömung ausgesetzt werden. Sie können prinzipiell in Flüssigkeiten und Gasen eingesetzt werden, der Einsatz in Flüssigkeiten kann sich wegen der notwendigen Füllung der Sonde und der Messleitung mit dem Strömungsmedium als recht schwierig herausstellen **[14]**. Druckmesssonden werden in Windkanälen zur Untersuchung der Umströmung von Flugkörpern und Kraftfahrzeugen und in Kavitationskanälen zur Untersuchung der Umströmung und des Antriebes von Schiffen benutzt. Weiterhin können die Drucksonden für Messungen in Kreisrohren und Rechteckkanälen eingesetzt werden. Die Geschwindigkeitsmessung an Flugzeugen erfolgt ebenfalls mit einer Staudrucksonde für Geschwindigkeiten bis 1,5 Ma **[2]**.

1.1.2 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 1.5a**). In der Verfahrenstechnik werden häufig

Flügelradanemometer verwendet (**Bild 1.5b**). Sie funktionieren nach einem ähnlichen Prinzip wie die Schalenkreuzanemometer, haben aber Flügel statt Propeller.

Bild 1.5a Schalenkreuzanemometer und Windfahne **[18]**

Bild 1.5b Flügelradanemometer **[19]**

Messprinzip

Im **Bild 1.6** ist ein Schalenkreuzanemometer schematisch dargestellt. Die Halbkugeln drehen sich im Luftstrom mit der Umfangsgeschwindigkeit **u** um die senkrechte Achse.

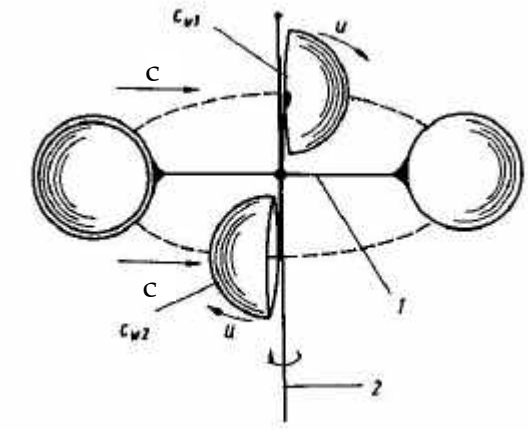


Bild 1.6 Schalenkreuzanemometer schematisch **[8]**

1 Kreuzstange mit Halbkugelschalen; **2** Achse; $\mathbf{c_w}$ Widerstandsbeiwert[6]; **u** Umfangsgeschwindigkeit; **c** Strömungsgeschwindigkeit

Der Antrieb erklärt sich aus den unterschiedlichen Widerstandsbeiwerten $\mathbf{c_w}$ der Halbkugelschalen. Die konvexe[7] Seite der Schale hat einen geringeren $\mathbf{c_w}$-Wert, als die

[6] $\mathbf{c_w}$-Wert: auch Widerstandsbeiwert genannt. Setzt sich zusammen aus Form- und Reibungswiderstand.

[7] nach außen gewölbt, erhaben

konkave[8] Seite. Die Schale mit der konkaven Seite wird daher vom Wind wegbewegt. Mit der Drehung der Schalen ändert sich sowohl der $\mathbf{c_w}$-Wert als auch die Fläche **A** der Einzelschalen. Die vom Fluid mit der Dichte $\mathbf{r_F}$ ausgeübte dynamische Kraft $\mathbf{F_F}$ entspricht der Gleichung **(1.5)**.

$$F_F = \frac{c_w \cdot A \cdot \rho_F \cdot c^2}{2} \qquad \textbf{(1.5)}$$

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 die Kalibrierung ermittelt wird. Der Widerstandsbeiwert $\mathbf{c_w}$ ist von der Reynolds-Zahl abhängig (siehe auch **Kapitel 6.7**). 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.

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 **[20]**.

Vor- und Nachteile der Schalenkreuzanemometer

Vorteile

- robuster Windgeschwindigkeitsmesser,
- wartungsarm, hohe Lebensdauer von ca. 20 Jahren (Lageraustausch je nach Einsatz alle 3 bis 6 Jahre) **[18]**,
- richtungsunempfindlich in der Ebene des Schalenkreuzes.

[8] hohl, nach innen gekrümmt

Nachteile

- reibungsabhängige Anlaufgeschwindigkeit,
- größere Linearitätsabweichung, wegen der Reynoldsabhängigkeit des Widerstandsbeiwertes c_w (siehe auch **Kapitel 6.7**),
- mäßige Genauigkeit von ca.1 %, **[32]**
- 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 Thermische Strömungsmessung

Das thermische Strömungsmessverfahren nutzt den Wärmetransport in einer Strömung zur Geschwindigkeitsmessung. Zu diesem Verfahren gehören unter anderem Messungen mit den Hitzdraht- und Heißfilmsonden.

1.2.1 Hitzdrahtsonden

Eine Hitzdrahtsonde besteht aus einem elektrisch erwärmten Draht, der zwischen zwei Haltespitzen gespannt ist. Der Draht ist auf die Spitze aufgeschweißt oder aufgelötet. Die stromführenden Haltespitzen sind in einem Keramikkörper eingelassen (**Bild 1.7a**).

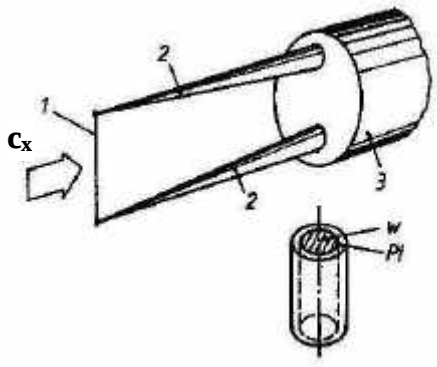


Bild 1.7a Standardhitzdrahtsonde mit Drahtausschnitt **[2]**

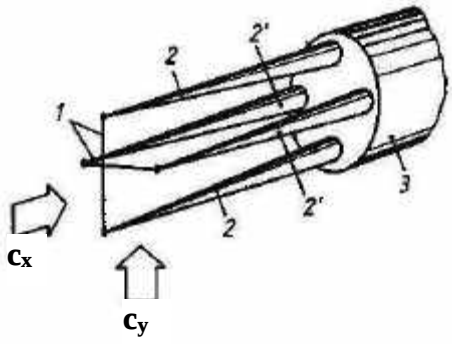


Bild 1.7b Dual- oder X-Drahtsonde **[2]**

1 Hitzdraht; **2, 2'** Haltespitzen; **3** Keramikhalter
c Strömungsgeschwindigkeit; **W** Wolframdraht; **Pt** Platin-Passivierungsschicht

Bild 1.7b zeigt eine Dual- oder X-Drahtsonde mit zwei senkrecht zueinander angeordneten Hitzdrähten. Damit lassen sich zwei Strömungskomponenten $\mathbf{c_x}$ und $\mathbf{c_y}$ gleichzeitig messen und die Strömungsgeschwindigkeit nach Richtung und Betrag in einem zweidimensionalen Strömungsfeld bestimmen. Da der Hitzdraht nur von einer zu der Drahtachse senkrechten Strömung eine Abkühlung erfährt, wird von dem waagerechtem Draht nur die $\mathbf{c_x}$ Komponente der Geschwindigkeit gemessen. Der senkrecht stehende Draht wird aus der Richtung $\mathbf{c_x}$ und $\mathbf{c_y}$ abgekühlt: misst also die Summe der beiden Geschwindigkeitskomponenten. Mit der bekannten $\mathbf{c_x}$-Komponente kann $\mathbf{c_y}$ ausgerechnet werden.
Nach diesem Prinzip funktionieren auch die Dreifachsonden mit entsprechend drei zueinander senkrechten Hitzdrähten.

Da der Sondenwiderstand $\mathbf{R_S}$ zur Gewinnung der Messgröße dient, wird ein Drahtmaterial gewählt, das einen hohen Temperaturkoeffizienten **a** hat und bei der Heiztemperatur möglichst korrosionsbeständig und mechanisch stabil ist (Gleichung **(1.6)**).

$$R_S = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T_S - T_0)] \qquad \textbf{(1.6)}$$

$\mathbf{R_S}$ Sondenwiderstand bei c > 0; $\mathbf{R_0}$ Sondenwiderstand bei c = 0; $\mathbf{T_S}$ Temperatur der Sonde bei c > 0; $\mathbf{T_0}$ Temperatur der Sonde bei c = 0; **a** Temperaturkoeffizient in 1/°C

Standardsonden nach **Bild 1.7** haben Wolframdrähte, die mit Platin beschichtet sind. Die Platinbeschichtung verhindert die Oxidation des Wolframs und verbessert die Langzeitstabilität der Sonde. Typische Werte für Sonden in der Luft sind:

Gesamtdurchmesser: 5 µm
Aktive Länge des Drahtes: 1 mm
Maximale Arbeitstemperatur der Sonde: 300°C
Geschwindigkeitsmessbereich: 0,15 – 200 m/s

Für höhere Arbeitstemperaturen der Sonde (maximal 800°C) werden Drähte aus Platin oder Platin-Iridium-Legierungen eingesetzt. Deren Geschwindigkeitsmessbereich beträgt 0,15 – 350 m/s **[2]**.

1.2.2 Heißfilmsonden

Die Heißfilmsonde hat an Stelle des Hitzdrahtes einen dünnen Metallfilm auf einem Quarzglassubstrat[9]. Am häufigsten wird die Fiberfilmsonde mit einem zylindrischen Quarzstäbchen als Filmträger benutzt. Die Enden des Stäbchens sind verkupfert, vergoldet und auf den Haltespitzen aufgelötet. Der Durchmesser der Heißfilmsonden beträgt ungefähr das 10-fache des Hitzdrahtdurchmessers. **Bild 1.8a** zeigt eine Standardsonde mit einem Schnitt durch die Faser. Auf der Faser befindet sich der Metallfilm und darüber eine SiO_2-Schutzschicht. Als Filmmaterial wird Platin oder Nickel verwendet **[2]**.

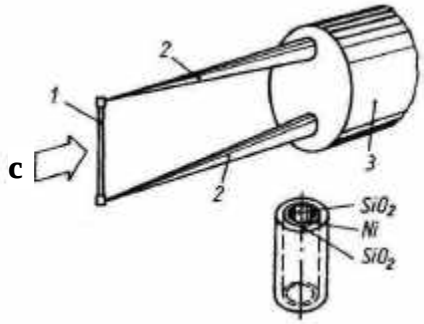


Bild 1.8a Standard Heißfilmsonde mit Faserausschnitt **[2]**
1 Fiberfilmsonde; **2** Haltespitzen;
3 Keramikhalter; **c** Strömungsgeschwindigkeit

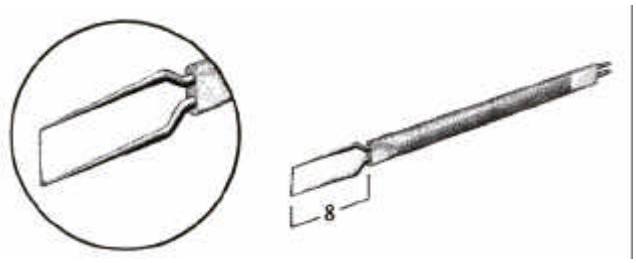


Bild 1.8b Verwendete Fiberfilmsonde Type 55R01 der Firma DISA **[9]**
gerade Mehrzwecksonde
Beschichtung 0,5 µm

Messprinzip

Für die Vermessung des Geschwindigkeitsprofils wurde eine Fiberfilmsonde verwendet. Diese Sonde ist aufgrund ihres relativ großen Durchmessers von 70 µm unempfindlicher gegen Staubpartikel in der Strömung (**Bild 1.8b**).

Das Messprinzip beruht auf dem Wärmetransport von einem elektrisch erwärmten Körper in das umgebende Medium. Dieser Transport ist von der Strömungsgeschwindigkeit dieses Mediums abhängig. Die Größe dieses konvektiven Wärmeverlustes bei der Abkühlung ist abhängig von einer Reihe von Parametern wie z.B. Temperatur, Druck und Geschwindigkeit des zu messenden Mediums. Wenn sich nur die Geschwindigkeit des zu messenden Mediums ändert oder wenn man durch geeignete Schaltungsmaßnahmen die Einflüsse der anderen Parameter eliminiert, dann ist der augenblickliche Wärmeverlust des Fühlers ein Maß für die augenblickliche Geschwindigkeit der Strömung **[9]**.

[9] Substrat: Grund, Grundlage

Messschaltungen

Zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit muss die von der Sonde abgegebene elektrische Leistung gemessen werden. Dazu benutzt man zwei Arten von Widerstandsbrückenschaltungen **[2]**:

- Konstant-Strom-Anemometer (CCA Constant Current Anemometer)
  Bei dieser Schaltung wird der Sondenstrom **I** konstant gehalten und der Sondenwiderstand $\mathbf{R_S}$ gemessen. Die CCA-Messschaltung eignet sich gut für kleinere Strömungsgeschwindigkeiten, denn die Empfindlichkeit nimmt mit wachsender Geschwindigkeit ab.
- Konstant-Temperatur-Anemometer (CTA Constant Temperature Anemometer)
  Hier wird der Sondenwiderstand $\mathbf{R_S}$ und damit seine Temperatur $\mathbf{T_S}$ konstant gehalten. Der Sondenstrom oder die Sondenspannung werden gemessen. Die CTA-Messschaltungen dominieren in der thermischen Geschwindigkeitsmesstechnik. Gegenüber der CCA-Sonde ist hier eine wesentlich höhere Empfindlichkeit über einen größeren Geschwindigkeitsbereich vorhanden. Nachteilig sind die Abweichungen bei den kleineren Strömungsgeschwindigkeiten.

Zur Versorgung der verwendeten Heißfilmsonde stand die Haupteinheit 55M01 der Firma DISA zur Verfügung. In dieser Haupteinheit sind die wesentlichen Komponenten zum Betreiben des Anemometers vorhanden (z.B. Verstärker, Filter, Dekadenwiderstand, Rechteckwellengenerator, Schutzschaltungen und andere Hilfsschaltkreise).
Das hier verwendete Konstanttemperatur–Anemometer besteht im wesentlichen aus einer „Wheatstoneschen Brücke“ und einem Regelverstärker (**Bild 1.9**).

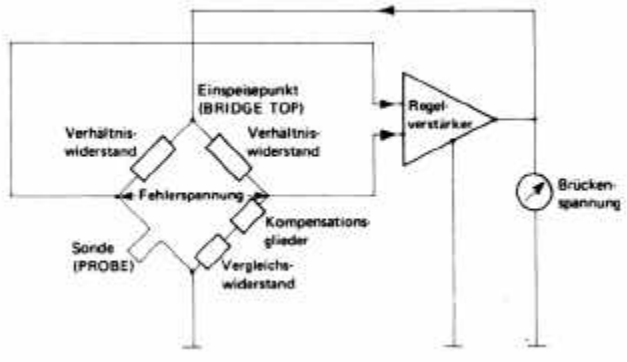


Bild 1.9 Prinzipschaltbild des Konstanttemperatur–Anemometers (CTA) **[9]**

Die Brücke hat eine aktive und eine passive Brückenhälfte. In der aktiven Brückenhälfte befindet sich die Sonde und ein Verhältniswiderstand. In der passiven befinden sich hingegen der Vergleichswiderstand, ein Verhältniswiderstand und einige Kompensationsglieder, zum Beispiel zum Ausgleich der Kabellänge. Ist die Brücke nun

abgeglichen, so besteht kein Spannungsunterschied zwischen den Endpunkten der waagerechten Brückendiagonale. Sobald sich allerdings der Widerstand aufgrund einer Strömungsänderung verändert, entsteht ein Spannungsunterschied, welcher mit Hilfe des Regelverstärkers ausgeglichen wird **[9]**.

Vor- und Nachteile der Hitzdraht- und Heißfilmanemometer

Mit der Entwicklung neuer Sondentypen, ihrer Miniaturisierung sowie der Verbesserung der Signalverarbeitung haben thermische Verfahren ihren Platz in der Strömungsmesstechnik behauptet.

Vorteile

- kleine Sondenabmessung – kleines Messvolumen (Durchmesser 5 µm, Länge 1 mm),
- geringe Trägheit gegenüber Strömungsschwankungen, hohe Grenzfrequenzen (bis 600 kHz) sind möglich: sehr gut für Turbulenzforschung geeignet,
- einfache Messschaltungen, geringer schaltungstechnischer Aufwand auch bei größeren Sondenentfernungen **[2]**.

Nachteile

- nicht eingriffsfreie Messmethode. Messelement, Kontakte und Halterung tauchen in das Fluid. Sonde beeinflusst die Strömung und unterliegt selbst der Korrosion,
- Strukturänderungen durch Temperatur, mechanische Spannungen und Schmutzablagerungen erfordern Nachkalibrierungen. Kalibrierungsfaktoren sind nur begrenzte Zeit gültig,
- Empfindlichkeit nimmt mit höherer Geschwindigkeit ab.

Anwendungsgebiete der Hitzdraht- und Heißfilmanemometer

Hitzdrahtsonden werden vorwiegend in Gasen und Heißfilmsonden in Flüssigkeiten und Gasen zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten eingesetzt. Der Messbereich des Hitzdrahtanemometers in der Luft beträgt 0,15 – 200 m/s und des Heißfilmanemometers 0,15 – 350 m/s. Aufgrund der geringen Trägheit gegenüber Strömungsschwankungen werden die Sonden auch in der Turbulenzforschung verwendet **[2]**.

1.3 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[10]. 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 Abtastraten arbeiten, Parameterdriftungen gut kompensieren, den Messort einstellbar machen oder auch eine schnelle zeitliche und räumliche Mittelung der Geschwindigkeit gewährleisten **[2]**.

1.3.1 Ultraschallanemometer

Ultraschallanemometer gehören zu einer neuen Generation von Windsensoren. Sie erfassen Luftströmungen in ein, zwei oder drei Dimensionen mit einer hohen Datenqualität **[21]**.

Messprinzip

Bild 1.10 Ultraschallanemometer **[25]** (Sonic Anemometer-Thermometer)

Zu dem physikalischen Grundprinzip gehört der Mitführungseffekt. Mit der Schallgeschwindigkeit in ruhender Luft **a** überlagert sich die Geschwindigkeits-komponente 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 1.10**).
Dieser Anemometer arbeitet nach dem Laufzeitdifferenzverfahren.

[10] Ultraschall: unhörbare Schallwellen sehr hoher Frequenz (größer als 20 000 Hz)

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 1.11**).

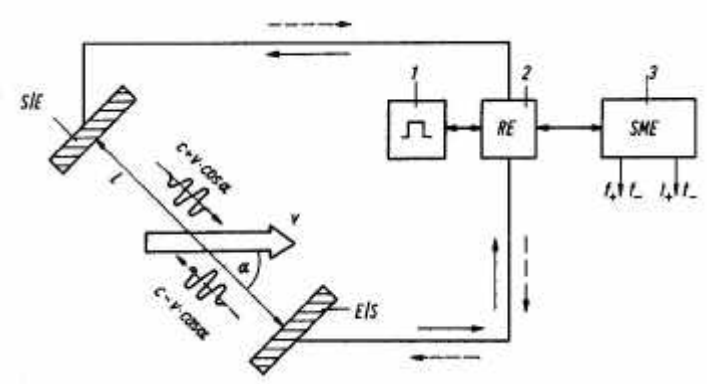


Bild 1.11 Impulslaufzeit – Messstrecke (Transite Time) mit Umlaufstreuung (Sing-around-Kreis) **[2]**

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 **a** bekannt ist, kann aus den beiden gemessenen Laufzeiten t_+ und t_- die Geschwindigkeit **c** der bewegten Luft in der Achse des Transducerpaares gemäß Gleichungen **(1.7)** bestimmt werden.

$$t_+ = \frac{L}{a + c \cdot \cos\alpha} \qquad t_- = \frac{L}{a - c \cdot \cos\alpha} \qquad \textbf{(1.7)}$$

Aus den Gleichungen **(1.7)** lässt sich die Differenz **Dt** und die Summe **St** der Laufzeiten bestimmen **[22]**:

$$\Delta t = t_- - t_+ = \frac{2 \cdot L \cdot c \cdot \cos\alpha}{a^2 - c^2 \cdot \cos^2\alpha} \qquad \sum t = t_- + t_+ = \frac{2 \cdot L}{a^2 - c^2 \cdot \cos^2\alpha} \qquad \textbf{(1.8)}$$

unter der Annahme, dass **a** >> **c** ist, gilt **[2]**:

$$\Delta t = t_- - t_+ \approx \frac{2 \cdot L \cdot c \cdot \cos\alpha}{a^2} \qquad \sum t = t_- + t_+ \approx \frac{2 \cdot L}{a^2} \qquad \textbf{(1.9)}$$

Die Gleichungen **(1.10)** lassen sich so auflösen, dass die Schallgeschwindigkeit **a** und die Windgeschwindigkeit **c** zu ermitteln ist **[22]**:

$$a = \frac{L \cdot (1/t_+ + 1/t_-)}{2 \cdot \cos\alpha} \qquad c = \frac{L \cdot (1/t_+ - 1/t_-)}{2 \cdot \cos\alpha} \tag{1.10}$$

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 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):

$$a = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} \tag{1.11}$$

Für die Berechnung der Schallgeschwindigkeit in der feuchten Luft wird die Gleichung **(1.11)** mit dem Faktor **K** erweitert. Dieser Faktor ist schwach von der Feuchte und chemischen Zusammensetzung der Luft abhängig. Es gilt also:

$$a = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T \cdot K} \tag{1.12}$$

Dieser Zusammenhang kann mit der folgenden Zahlenwertgleichung angenähert werden:

$$T = \left(\frac{a}{20{,}05} \right)^2 \tag{1.13}$$

wobei **T** die Virtuelltemperatur in K und a die Schallgeschwindigkeit in m/s ist **[7]**.

1.3.2 SODAR

Das SODAR-System (**So**nic **D**etecting **a**nd **R**anging) ist ein akustisch arbeitendes Fernmessverfahren, welches die windspezifischen Größen wie die Windgeschwindigkeit und -richtung erfasst. Durch die SODAR-Technik können der dreidimensionale Windvektor $\mathbf{c} = (c_x, c_y, c_z)$ und die Standardabweichungen der Komponenten als Funktion der Höhe über einen Bereich von etwa 40 bis 600 m über dem Grund von einer vertikalen Auflösung von typischerweise 20 m erfasst werden **[8]**.

Bild 1.12a Mini-SODAR der Firma AeroVironment **[23]**

Bild 1.12b MODOS Mobiles Doppler SODAR der Firma METEK **[25]**

Das SODAR (**Bild 1.12a** und **b**) stellt ein mobiles System dar und ermöglicht die berührungslose Messung der Windverhältnisse vom Erdboden aus. Das Messsystem ist schnell zu installieren und kann somit an mehreren Messstandorten eingesetzt werden. Das System ist so konzipiert, dass es autark[11] über mehrere Tage betrieben werden kann. Mit Hilfe des SODAR kann der Turbulenzgrad in stark strukturierter Umgebung bestimmt werden.

[11] selbstversorgend

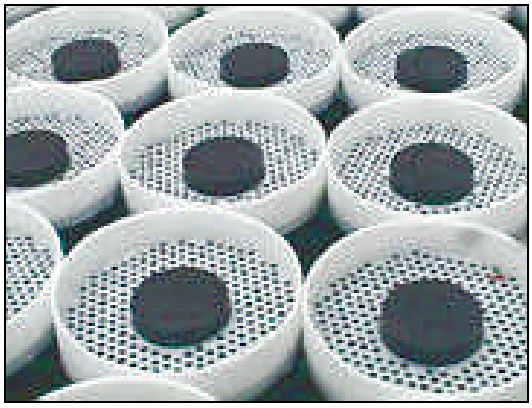


Bild 1.13 Lautsprecherarray **[24]**

Das System besteht aus den drei grundlegenden Bestandteilen **[17]**:

- Antennensystem (**Bild 1.12a** und **b** mit Lautsprecherarray[12] (**Bild 1.13**) und akustischer Abschirmung,
- akustischer Signalprozessor mit Sende- und Empfangseinheit sowie einem Prozessrechner mit Fast-Fourier-Analyse zur Bestimmung der Doppler-Verschiebung,
- Computer mit Bedien- und Anzeigesoftware

Messprinzip

Beim SODAR-Verfahren werden drei hörbare Schallimpulse zeitlich und räumlich gebündelt an die Atmosphäre abgestrahlt. Diese Impulse sind sehr energiereich. Daher wird, um Energie zu sparen, eine Frequenz von nur 1600 Hz und nicht ein Schall mit einer höheren Frequenz, wie z. B. Ultraschall verwendet. Das an Inhomogenitäten aus der Atmosphäre zurückgestreute Signal wird auf die Dopplerverschiebung[13] analysiert. Die Laufzeit des abgestrahlten und wieder empfangenen Signals ist ein Maß für den Abstand zwischen der Schallquelle und der streuenden Inhomogenität. Aus Laufzeit, Intensität und Frequenzverschiebung des zurückgestreuten Zeitsignals werden die Profile der Rückstreuamplitude in Strahlrichtung bestimmt. Mit Hilfe trigonometrischer Funktionen wird die horizontale Windgeschwindigkeit aus den Windkomponenten in Strahlrichtung berechnet.

Doppler Effekt

Das SODAR-Verfahren basiert auf dem Doppler Effekt. Sendet eine Schallquelle ein Signal mir der Frequenz $\mathbf{f_0}$ aus, so stellt ein Beobachter, der sich mit der Geschwindigkeit **c** auf die Quelle zubewegt (Vorzeichen +) oder von ihr fortbewegt (Vorzeichen -), eine Frequenz $\mathbf{f_1}$ fest **(1.14)**.

$$f_1 = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{c}{a}\right) \qquad \textbf{(1.14)}$$

Auch bei einer Bewegung der Quelle gegenüber dem Beobachter tritt eine Frequenzverschiebung auf:

[12] Array: reihenartige Anordnung gleichartiger elektronischer Bauelemente

[13] Doppler Effekt: nach dem österreichischen Physiker Christian Doppler

$$f_2 = f_1 \cdot \frac{1}{1 \mp c/a} \qquad \textbf{(1.15)}$$

Beim Sodar ist die Inhomogenität der Luft sowohl Beobachter als auch Quelle. Die Frequenz beträgt deshalb:

$$f_2 = f_0 \cdot \frac{1 \pm c/a}{1 \mp c/a} \qquad \textbf{(1.16)}$$

Höhenzuordnung

Der Schall legt in der Zeit **t** den Weg $a \cdot t$ zurück. Bei einer vertikal gerichteten Antenne beträgt die Höhe **h** zwischen SODAR-Antenne und der Inhomogenität: $h = a \cdot t/2$, wenn **t** die Zeit zwischen Senden und Empfangen ist. Wenn der Schall aus einem Winkel j zu der Vertikalen gesendet wird, ist $h = a \cdot t \cdot \cos \varphi/2$. Den Zusammenhang zwischen der Laufzeit des Schalls und der Höhenzuordnung zeigt **Bild 1.14**.

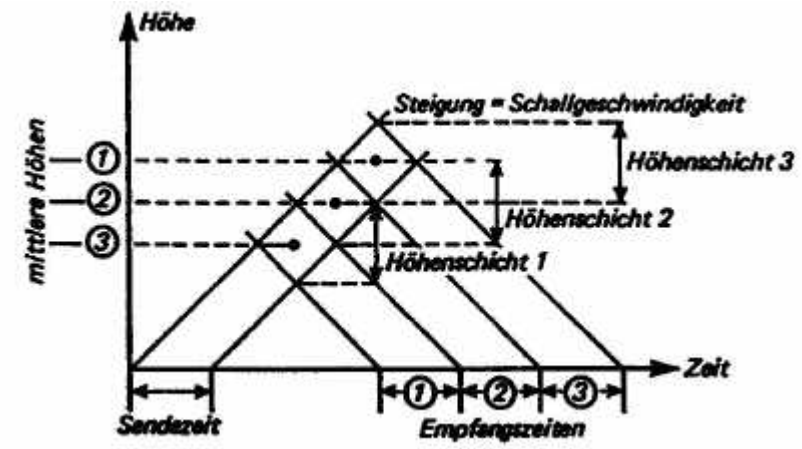


Bild 1.14 Schematischer Zusammenhang zwischen Laufzeit und der Messhöhe

Die Neigung der Geraden ist die Schallgeschwindigkeit **a**.
Aus dem **Bild 1.14** ist auch ersichtlich, dass beim Sodar keine Punktmessung, sondern eine Volumenmessung vorliegt **[8]**.

Durch die 3-Komponentenmessung und der Neigung zweier ausgesendeten Impulse, werden die ermittelten Ergebnisse aus einem kegelförmigen Messvolumen bestimmt. Das SODAR-System kann durch seine einstellbare Höhenauflösung ein Windprofil darstellen (**Bild 1.15**) **[17]**.

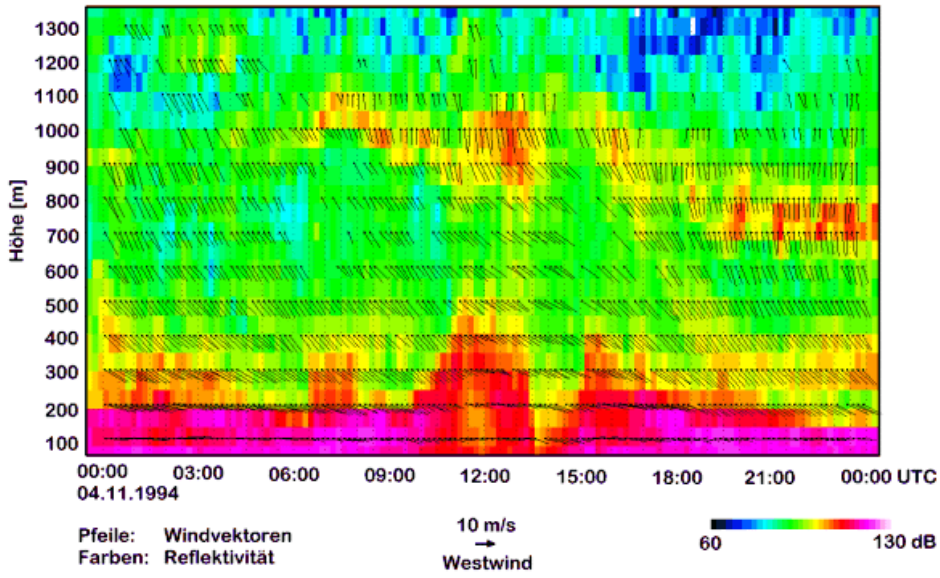


Bild 1.15 Horizontale Windvektoren sowie Schall-Rückstreuintensität; gemittelt über 10 Minuten mit einer vertikalen Auflösung von 50 m **[26]**

Vor- und Nachteile der akustischen Strömungsmessung

Ultraschallanemometer und SODAR 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 **[21]**.

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.

Ultraschallanemometer

- Kurze Messzeiten möglich (1 bis 10 µs je Messwert), d. h. schnelle Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit nach Richtung und Betrag messbar,
- gleichzeitig Temperatur- und Schallgeschwindigkeitsmessung.

SODAR

- Mobiler Einsatz, autarker Betrieb möglich,
- keine Baugenehmigung, wie z.B. für die Windmessmaste, notwendig.

Nachteile

- Hoher Preis gegenüber mechanischen Wandlern.

Ultraschallanemometer

- Relativ hoher Aufwand für Genauigkeiten von ±1% vom Messwert **[2]**.

SODAR

- Relativ schlechte Genauigkeit: ±10 % vom Messwert **[26]**.

Anwendungsgebiete der akustischen Strömungsmessung

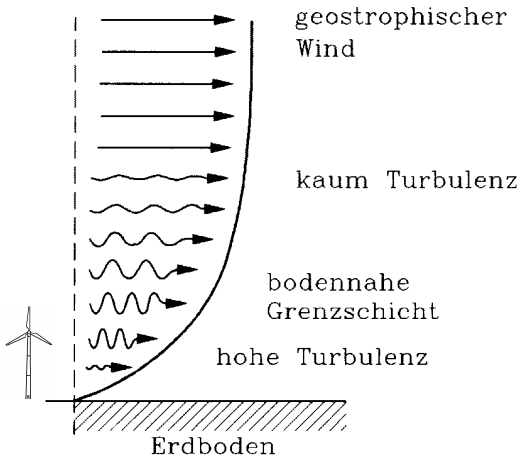
Akustische Strömungsmesser sind zuverlässige Messmittel in der Meteorologie und werden vorzugsweise zur Untersuchung atmosphärischer Turbulenzen eingesetzt. Ultraschallanemometer werden zur Strömungs- und Durchflussmessung in Flüssigkeiten (climb-on Verfahren) und Gasen eingesetzt. Sie sind in allen 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 **[21]**.

Das Sodar wird in der Erforschung der bodennahen Atmosphäre und für die Analyse der Grenzschichtdaten für komplexe Ausbreitungsmodelle eingesetzt. Auch in der Grundlagenforschung wird diese Technik zur speziellen Berechnung der Schadstoffkonzentration angewendet **[24]**. Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet findet sich bei der Windenergienutzung. Dort wird es zur Vermessung von Windprofilen verwendet. Die aufwendige und kostenintensive Installation von ca. 100 m hohen Windmessmasten mit kalibrierten Schalenkreuzanemometern und Windfahnen entfällt **[17]**.

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[14] 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.

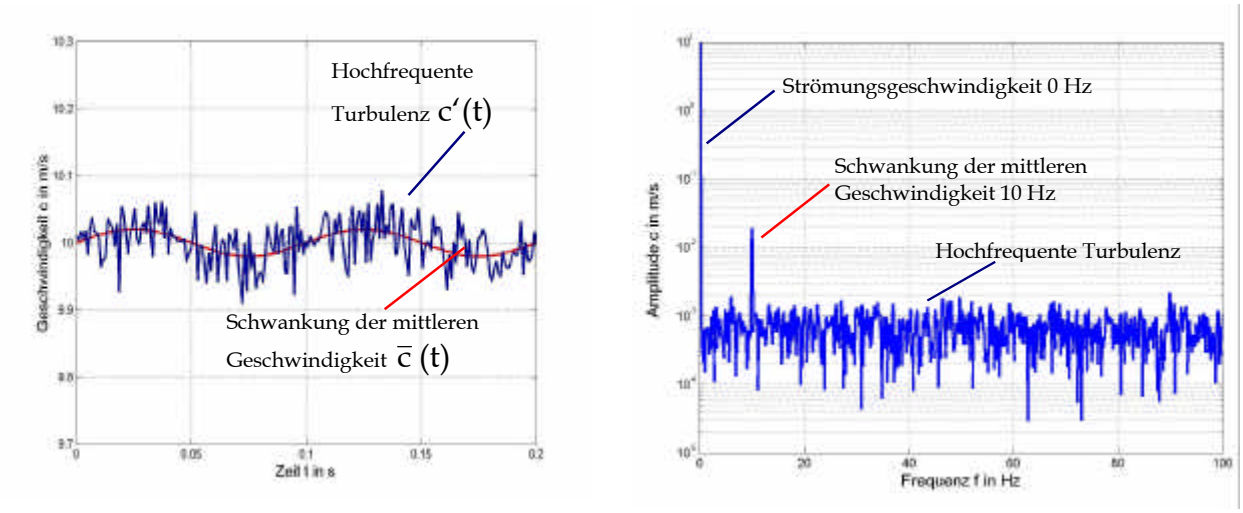
Bild 2.1 Bodennahe Grenzschicht **[3]**

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 Bodenrauhigkeit 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 **c** setzt sich aus der mittleren Geschwindigkeit $\bar{\mathbf{c}}$ und deren Schwankung **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).

[14] Geostrophisch: der Wind, der noch keine Störung durch die Struktur der Erdoberfläche erfahren hat



a) Zeitsignal **b)** ungemitteltes 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 bei dieser Messung 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 **[12]**:

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

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

$$\bar{c} = \sqrt{\left(\bar{c}_x^2 + \bar{c}_y^2 + \bar{c}_z^2\right)} \qquad \textbf{(2.2)}$$

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 **[12]**:

$$\bar{c}'^2_x = \frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} c'^2_x \, dt \qquad \bar{c}'^2_y = \frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} c'^2_y \, dt \qquad \bar{c}'^2_z = \frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} c'^2_z \, dt \qquad \textbf{(2.3)}$$

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

$$\overline{|c'|} = \sqrt{\frac{\left(\overline{c'^2_x} + \overline{c'^2_y} + \overline{c'^2_z}\right)}{3}} \qquad \textbf{(2.4)}$$

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

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

Bei einer isotropen[15] Strömung sind die Geschwindigkeitsschwankungen in x, y und z Richtung identisch: $\overline{c'^2_x} = \overline{c'^2_y} = \overline{c'^2_z} = \overline{c'^2}$. In diesem Fall spricht man von der isotropen Turbulenz **[1]**:

[15] Isotrop: Bezeichnung für Stoffe, die in jeder Richtung die gleichen physikalischen Eigenschaften aufweisen

$$Tu_{isotrop} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{3 \cdot \overline{c'^2}}{\bar{c}_x^2 + \bar{c}_y^2 + \bar{c}_z^2}} = \frac{\sqrt{\overline{c'^2}}}{\bar{c}} \qquad \textbf{(2.6)}$$

Die Schwankungsgröße **c'** kann gemessen werden. Die Vorraussetzung 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 **c'** durch eine FFT[16]-Analyse des Zeitsignals ermitteln (siehe auch **Kapitel 4.1**).

2.3 Messung der turbulenten Strömung mit dem Prandtlschen Staurohr

Bei Messungen mit Staurohren bewirken vorhandene Geschwindigkeitsschwankungen, dass der angezeigte mittlere dynamische Druck zu groß ist und sich damit zu große Strömungsgeschwindigkeiten berechnen.

$$c = \sqrt{2 \cdot \frac{p_g - p_{st}}{\rho}} \qquad \textbf{(2.7)}$$

mit $c = \bar{c} + c'$ und $p = \bar{p} + p'$ folgt nach Mittelung:

$$\bar{c} = \sqrt{2 \cdot \frac{\bar{p}_g - \bar{p}_{st}}{\rho} - \overline{c'^2}} \textbf{ [14]} \qquad \textbf{(2.8)}$$

Die Kalibrierung der Anemometer erfolgte bei einer Normalanströmung und bei einer mit einem speziellen Sieb erzeugten Turbulenz von ca. 8 %. Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit wurde ein Prandtlsches Staurohr benutzt. Die Geschwindigkeit wurde mit den Gleichungen **(2.7)** und **(2.8)** berechnet. Bei der Berücksichtigung des Turbulenzanteiles **c'** ergab sich nur eine sehr geringe Abweichung von ca. –0,3 % im Vergleich zur Rechnung ohne den Turbulenzanteil (**Tabelle 2.1**). Der zu erwartende Messfehler lag hier in der Messgenauigkeit von 1 % des Messwertes.

[16] Fast Fourier Transformation (siehe Kapitel 2)

Tabelle 2.1 Einfluss der Turbulenz auf das Prandtlsche Staurohr bei einem Turbulenzgrad von ca. 8 %

Berechnet mit der Gleichung 2.7	**Berechnet mit der Gleichung 2.8**		**Vergleich der Geschwindigkeiten**	
Geschwindigkeit	Schwankung	Geschwindigkeit	Abweichung	Abweichung
c in m/s	c' in m/s	$\bar{c}$ m/s	$\Delta c = c - c'$ in m/s	$\bar{c}$ zu c in %
5	0.4	4.984	0.016	-0.322
10	0.8	9.968	0.032	-0.322
15	1.2	14.952	0.048	-0.322

3 Vorbereitung zur Profilvermessung

Um eine Aussage über die Qualität der Windkanalströmung zu erhalten, wurde der Windkanal „Göttinger Bauart“ der FH-Düsseldorf mit Hilfe der Hitzdrahttechnik vermessen. Dieses Vorgehen war nötig, um den vorhandenen Turbulenzgrad und die Abweichung von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit aufzunehmen, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Kalibrierung der Anemometer hat. Weiterhin konnte somit eine Aussage getroffen werden, welche Abmaße die einzelnen Anemometer maximal besitzen dürfen, damit eine homogene Anströmung sichergestellt ist. Zum genauen Positionieren der Fiberfilmsonde wurde ein 3-Achsen Koordinatentisch der Firma ISEL verwendet (**Bild 3.1**).

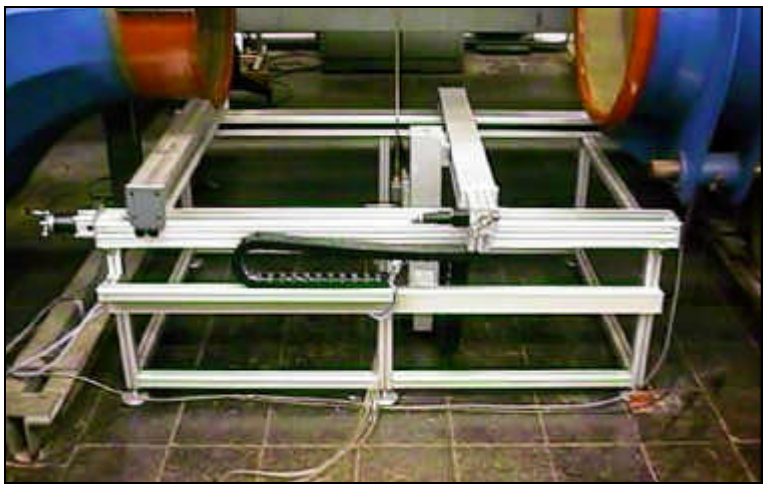


Bild 3.1 3-Achsen Koordinatentisch

Da der Koordinatentisch einen maximalen Verfahrweg von ca. 33 cm in vertikaler Richtung aufweist, wurden zwei Strömungshalbprofile getrennt aufgenommen (**Bild 3.2**). Die Radien, auf denen die einzelnen Messpunkte lagen, wurden in 45 Grad Schritte angeordnet. Wie man in der linken Skizze sehen kann, ragt die breite Führung des Koordinatentisches sehr weit in die Strömung. Die dadurch verursachten Verwirbelungen wirkten sich negativ auf die Messwerte aus. Um trotzdem korrekte Ergebnisse erzielen zu können, wurden die 0-Grad und 180-Grad-Messwerte vom oberen Halbprofil vernachlässigt und stattdessen die Ergebnisse vom unteren Halbprofil verwendet.
Für den Mittelpunkt wurden zwei leicht unterschiedliche Messwerte aufgenommen (beim oberen und unteren Halbprofil). Deshalb wurden die Mittelpunktswerte für weitere Auswertungen gemittelt.

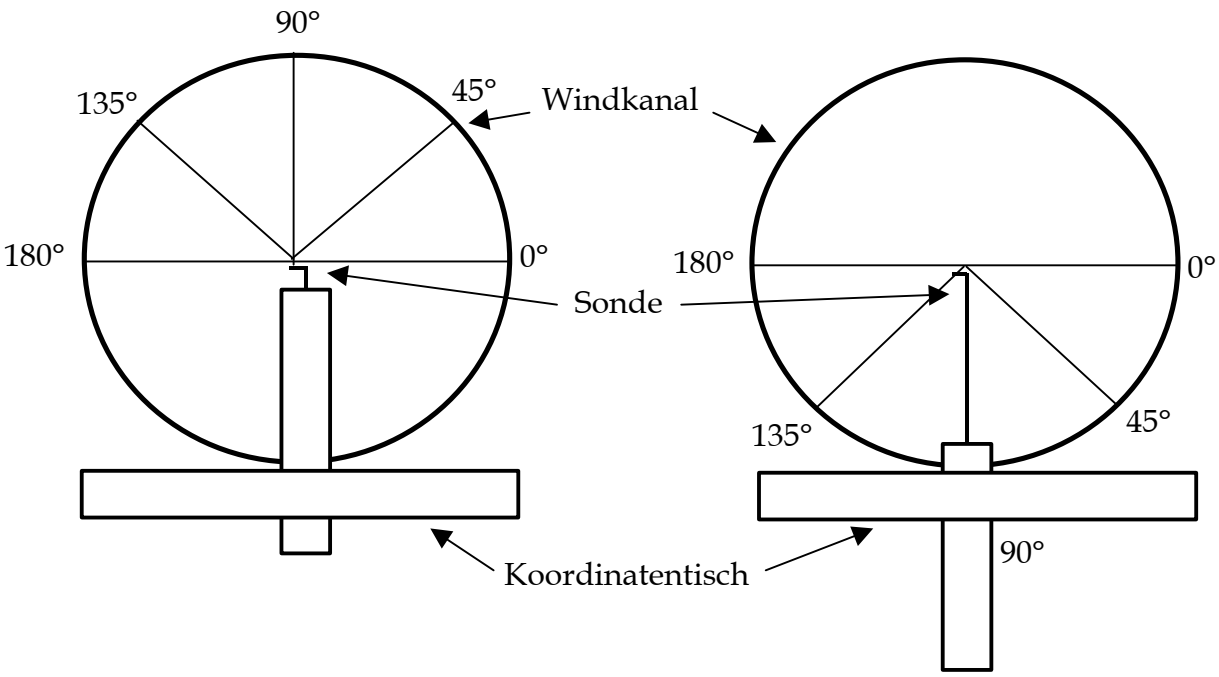


Bild 3.2 Darstellung des oberen und unteren Halbprofils

3.1 Programmierung der Software

Die Steuerung des Koordinatentisches erfolgte über die Com-Schnittstelle eines herkömmlichen PCs (**Bild 3.3**). Hierfür musste ein Programm in der Programmiersprache Visual Basic unter „Microsoft Excel" geschrieben werden. Mit diesem Programm wurde auch die Aufnahme der Messdaten automatisiert, sodass während der Messung nur einige Parameter wie Temperatur und Widerstand überprüft werden mussten (Das Programm ist im Anhang hinterlegt) **[10]**.

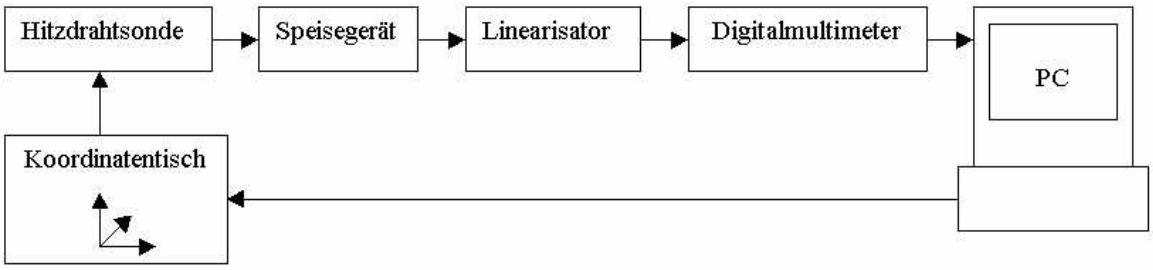
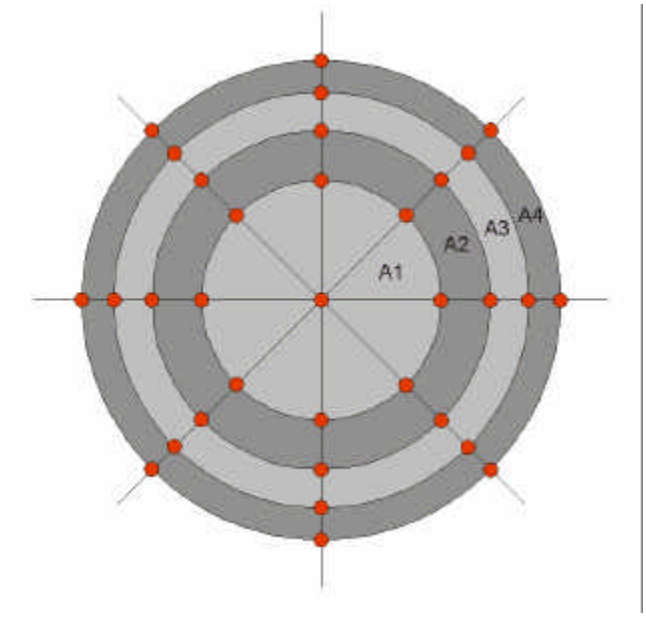


Bild 3.3 Messkette zur Aufnahme des Strömungsprofils und des Turbulenzgrades

3.2 Positionierung der Messpunkte

Die Positionierung der Messpunkte erfolgte nach einer exponentiellen Verteilung in Anlehnung an das sogenannte **Schwerelinienverfahren**. Bei diesem Verfahren werden die Flächen so angeordnet, dass jede einzelne Ringfläche gleich groß ist (**Bild 3.4**). Diese Technik erleichtert die Volumenstrombestimmung.



A1 = A2 = A3 = A4 = usw.

Bild 3.4 Positionierung der Messpunkte in Anlehnung an das Schwerelinienverfahren (Beispielskizze mit 4 Ringen, bei der Messung wurden 6 Ringe verwendet)

3.3 Messung mit der Fiberfilmsonde

3.3.1 Aufnahme der Kalibrierkurve für die Fiberfilmsonde

Um eine korrekte Aussage über die Strömungsgeschwindigkeit zu erhalten, ist es notwendig, die Fiberfilmsonde mit dem auch in der Messung verwendeten Anschlusskabel zu kalibrieren. Dies erfolgt in einer Eigens für diese Zwecke entwickelten Kalibriereinheit der Firma DISA (**Bild 3.5**).

Bild 3.5 Kalibriereinheit DISA Typ 55D45 für die Kalibrierung der Fiberfilmsonde

Mit Hilfe der Kalibriereinheit der Firma DISA kann man mittels Druckluft die gewünschten Strömungsgeschwindigkeiten erzeugen und somit die Sonde kalibrieren. Durch Variation des Düsenaustrittsquerschnittes sind Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu einem Mach[17] (Schallgeschwindigkeit) möglich. Diese Einheit verfügt über einen Turbulenzgrad von 1% bei 20 m/s (laut Hersteller).

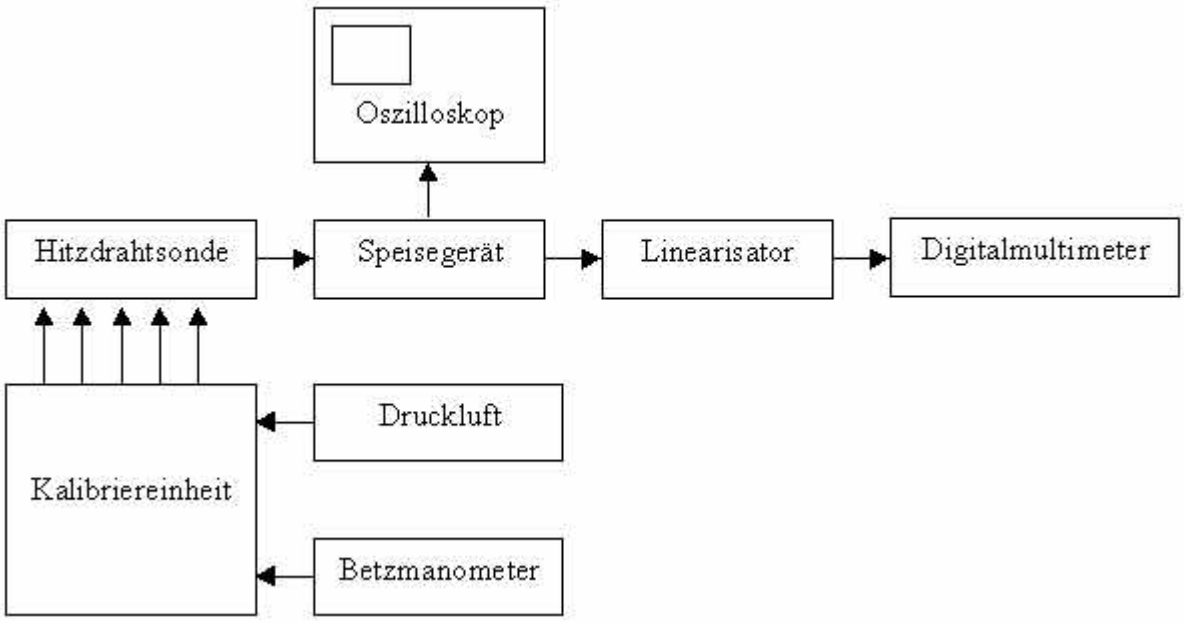
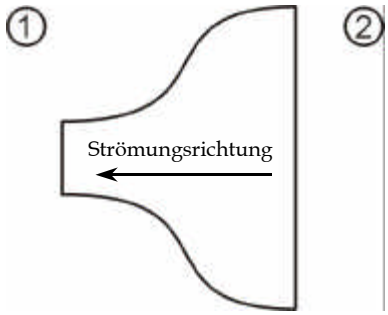


Bild 3.6 Verschaltung der Geräte bei der Kalibrierung

In **Bild 3.6** ist die Verschaltung der benötigten Geräte dargestellt, welche zur Kalibrierung der Fiberfilmsonde notwendig sind.

[17] österreichischer Physiker Ernst Mach, 1838-1916

Durch das Messen von nur drei Größen kann man nun die Austrittsgeschwindigkeit der Kalibriereinheit bestimmen. Diese drei Messgrößen sind:



Barometerstand: $p_1 = p_b$
Luftdruck vor der Düse: p_2
Lufttemperatur: $t_1 = t_2$

Mit Hilfe der vereinfachten Bernoulli Gleichung **[1]**:

$$\frac{c_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + \cancel{g \cdot h_1}^{\,0} = \frac{c_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \cancel{g \cdot h_2}^{\,0}$$ (Höhenunterschied ist vernachlässigbar klein) **(3.1)**

$$\frac{c_1^2}{2} - \frac{c_2^2}{2} = \frac{p_2 - p_1}{\rho}$$

und der Kontinuitätsgleichung **[1]**:

$$c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2 \qquad \Rightarrow \qquad c_2 = \frac{c_1 \cdot A_1}{A_2} \qquad \textbf{(3.2)}$$

folgt mit $p_2 - p_1 = \Delta p$ $\Rightarrow$ $$\frac{c_1^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} \cdot \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 = \frac{\Delta p}{\rho}$$

nach c_1 aufgelöst:

$$\frac{c_1^2 \cdot A_2^2 - c_1^2 \cdot A_1^2}{2 \cdot A_2^2} = \frac{\Delta p}{\rho}$$

$$\frac{c_1^2 \cdot \left(A_2^2 - A_1^2\right)}{2 \cdot A_2^2} = \frac{\Delta p}{\rho}$$

$$c_1 = A_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \left(A_2^2 - A_1^2\right)}} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Vereinfachung:

für $A_1 < A_2$ $\Rightarrow$ $A_1^2 << A_2^2$ **(3.4)**

$$\Rightarrow \qquad c_1 \approx \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \qquad \textbf{(3.5)}$$

Die Abweichung, die durch die Vereinfachung mit der Gleichung **(3.4)** entsteht, ist sehr gering. Sie steigt mit zunehmender Größe des Austrittsquerschnittes an. Nach einer

Rechnung, die diese Diskrepanz untersucht hat, ergibt sich bei einem maximal möglichen Düsenaustrittsquerschnitt von 120 mm² ein rechnerischer Fehler von maximal 0,09 %. Daher ist die Austrittsgeschwindigkeit mit Gleichung **(3.5)** berechnet worden.

3.3.2 Richtcharakteristik

Weiterhin verfügt die Kalibriereinheit über eine Winkelteilung, mit der man die eingespannte Sonde auf ihre Richtungsempfindlichkeit vermessen kann. Bei der Untersuchung dieser Richtungsempfindlichkeit wurden folgende Ergebnisse erzielt:

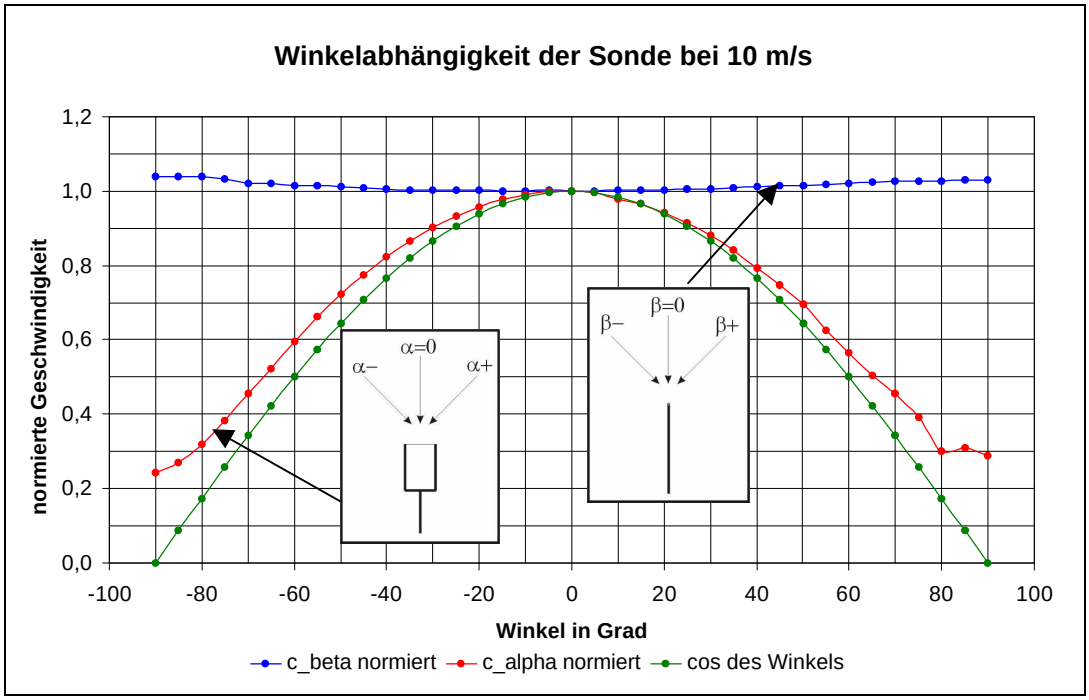


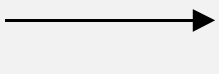
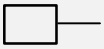
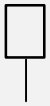
Bild 3.7 Richtungsempfindlichkeit der Hitzdrahtsonde

Bei diesem Versuch wird die Sonde unter verschiedenen Anströmwinkeln in den Freistrahl der Kalibriereinheit gebracht. In dem **Bild 3.7** wurde die dimensionslose, normierte Geschwindigkeit über den eingestellten Winkel aufgetragen. Besonders im Fall a ist deutlich der Einfluss einer Schräganströmung zu erkennen.
Wird die Sonde um 30 Grad schräg aus der b-Richtung angeblasen, so ist ein Messfehler von maximal 0,7 % die Folge. Also wird bei einer Drehung in diese Richtung auch eine korrekte Geschwindigkeit gemessen. Einen wesentlich größeren Einfluss hingegen hat die Schräganströmung aus der um 90 Grad versetzten a-Richtung. In diesem Fall sind Fehler von 12 % bei einem Anstellwinkel von 30 Grad zu verzeichnen. Ab 10 Grad kann mit Abweichungen von 2 % gerechnet werden.
Bei der Fehlanströmung aus der a-Richtung erhält man immer Werte, welche unterhalb des Wertes der korrekten Anströmung liegen. Diese Tatsache ist vermutlich auf die Strömungsablösungen an den Haltezinken zurückzuführen, welche das korrekte

Abkühlen verhindern. Bei Fehlanströmung aus der b-Richtung hingegen, erhält man ständig gering erhöhte Messwerte.
Bei der Vermessung des Geschwindigkeitsprofils wurde die Sonde in einem Bereich von maximal ±5 Grad ausgerichtet und der Fehler durch eine Fehlanströmung somit auf ±0,5 % begrenzt.

Anströmung der Sonde aus verschiedenen Richtungen
Auch die verschiedenen Einbaumöglichkeiten in den Windkanal sind in der Kalibriereinheit getestet worden. In **Tabelle 3.1** sind diese dargestellt.

Tabelle 3.1 Gemessene Geschwindigkeiten bei unterschiedlichen Einbaumöglichkeiten der Hitzdrahtsonde

Strömungsrichtung	**Fall 1**	**Fall 2**	**Fall 3**	**Fall 4**
				
Geschwindigkeits Gleichanteil in m/s	10,031	10,001	3,190	10,040
Geschwindigkeits Wechselanteil in m/s	0,044	0,044	0,140	0,046

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Fall **3** zu starken Abweichungen der Geschwindigkeit führt. Dies ist vermutlich auf die schon erwähnte Einwirkung der Haltezinken zurückzuführen. Besonders auffallend ist der hohe gemessene Wechselanteil der Strömungsgeschwindigkeit, was wiederum ein Indiz für die turbulente Strömung durch die Zinken ist. In den anderen drei Fällen sind kaum Geschwindigkeitsabweichungen vorhanden, da die Strömung ungehindert den Draht passieren kann.

3.3.3 Linearisierung des Signals

Die Ausgangsspannung eines Konstant-Temperatur-Anemometers ist eine nichtlineare Funktion der Strömungsgeschwindigkeit. Daher wird dieses Signal mit Hilfe eines sogenannten Linearisators in eine lineare Ausgangsspannung umgewandelt. Um die verschiedenen Einstellungen am Linearisator durchführen zu können, wurde das Spannungssignal des Fiberfilmanemometers logarithmisch über die Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen und somit der Exponentenfaktor ermittelt.
Die Einstellung des Linearisators erfolgte so, dass eine Strömungsgeschwindigkeit von 5 m/s eine Ausgangsspannung von 0,5 V darstellt und 50 m/s einen Wert von 5 V ergeben. Die Vorgehensweise mit dem Linearisator ist nicht mehr die gängige, da diese

Berechnung heutzutage meist in einem PC erfolgen. Bei den Messungen ist diese Linearisiertechnik jedoch aufgrund der einfachen Handhabung trotzdem angewandt worden. Für den Einsatz der Digitalmultimeter ist ein vorgeschalteter Linearisator aber notwendig, da zunächst linerarisiert und dann gemittelt werden muss um Rechenfehler zu vermeiden. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass man eine direkte Aussage über die Strömungsgeschwindigkeit erhält. So weiß man zum Beispiel sofort, dass die Anzeige von 1 V einer Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/s entspricht.

3.3.4 Grenzfrequenz der Fiberfilmsonde

Die Grenzfrequenz eines Hitzdrahtanemometers gibt an, bis zu welcher Frequenz ein turbulentes Schwanken der Strömungsgeschwindigkeit erfasst werden kann. Diese Frequenzen sind für ein Konstanttemperatur - Anemometer abhängig von einer Vielzahl von Parametern, wie zum Beispiel: das Medium, in dem gemessen wird, die Geschwindigkeit, der Sondentyp, das Überhitzungsverhältnis[18] sowie die Verstärkung und das Frequenzverhalten des Verstärkers **[9]**. Um nun eine Aussage über das Frequenzverhalten treffen zu können, muss die Sonde einer plötzlichen Geschwindigkeitsänderung ausgesetzt werden. Da es jedoch schwierig ist, definierte plötzliche Geschwindigkeitsänderungen zu erzeugen, simuliert man dies durch Einspeisen von Rechtecksignalen in die Brücke. Die Brücke und der Regelverstärker sind optimal eingestellt, sobald der am Ausgang angeschlossene Oszillograph eine möglichst kurze Impulsantwort ohne großartige Überschwinger darstellt. **Bild 3.8** zeigt schematisch das zu erwartende Bild des Oszillographen.

[18] Überhitzungsverhältnis: $a = \frac{R - R_0}{R_0}$ (R = Fühlerwarmwiderstand; R_0 = Fühlerkaltwiderstand bei t_0)

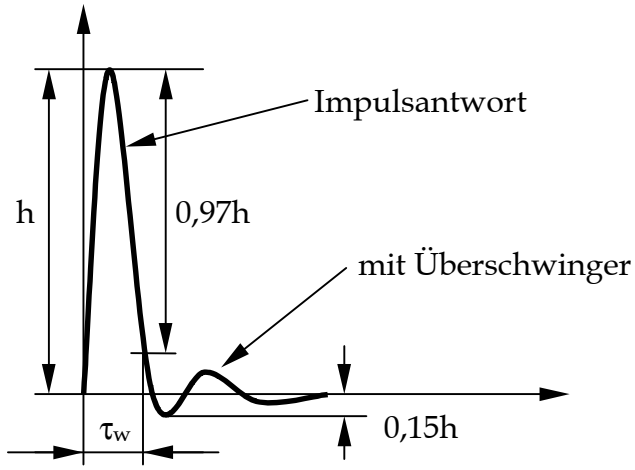


Bild 3.8 Zeitverlauf des Fiberfilmanemometers beim aufgeprägten Rechtecksignal und optimal abgeglichenen Brücke.

Anhand des Bildes wird nun die Impulsbreite t_w in Sekunden ermittelt. Mit diesem Wert kann man wie folgt die Grenzfrequenz f_c berechnen:

$$f_c = \frac{1}{1{,}3 \cdot \tau_w} \textbf{ [16]} \qquad \textbf{(3.6)}$$

Bei der oben beschriebenen Untersuchung wurde ein **h** von 0,38 Volt und ein t_w von 0,14 ms ermittelt. Daraus ergab sich dann mit der Gleichung **(3.6)** eine Grenzfrequenz von 5,49 kHz.

3.3.5 Multimeter

Zum Messen der Ausgangsgrößen verschiedener Anemometer, wie zum Beispiel Spannung oder Frequenz, wurden die Multimeter „Voltkraft M-4660M“ verwendet.

Frequenzanalyse des Multimeters

Um die Korrektheit der Messdaten gewährleisten zu können, wurden die verwendeten DMM[19] hinsichtlich ihres Frequenzganges überprüft. In **Bild 3.9** wurde das verwendete Multimeter Nr. 12 mit einem geeichten Multimeter gleicher Bauart und einem weiteren Multimeter des Herstellers FLUKE (FLUKE 77 Multimeter) verglichen. Hierbei wurde mit Hilfe des „Dynamic Signal Analyzer 35665A“ der Firma Hewlett-Packard ein Sinussignal mit vordefinierter Amplitude generiert. Bei drei verschiedenen Amplituden wurde gemessen, um eine Aussage über die Einwirkung der Signalstärke geben zu können. Durch diesen Vorgang kam die Erkenntnis, dass sich der Frequenzbereich, in

[19] **D**igital **M**ulti**m**eter

dem das Multimeter korrekt anzeigt, sich je nach Amplitudenstärke verschiebt. Dies bedeutet also, dass bei Sinussignalen größerer Amplitude auch höhere Frequenzen genauer messbar sind.

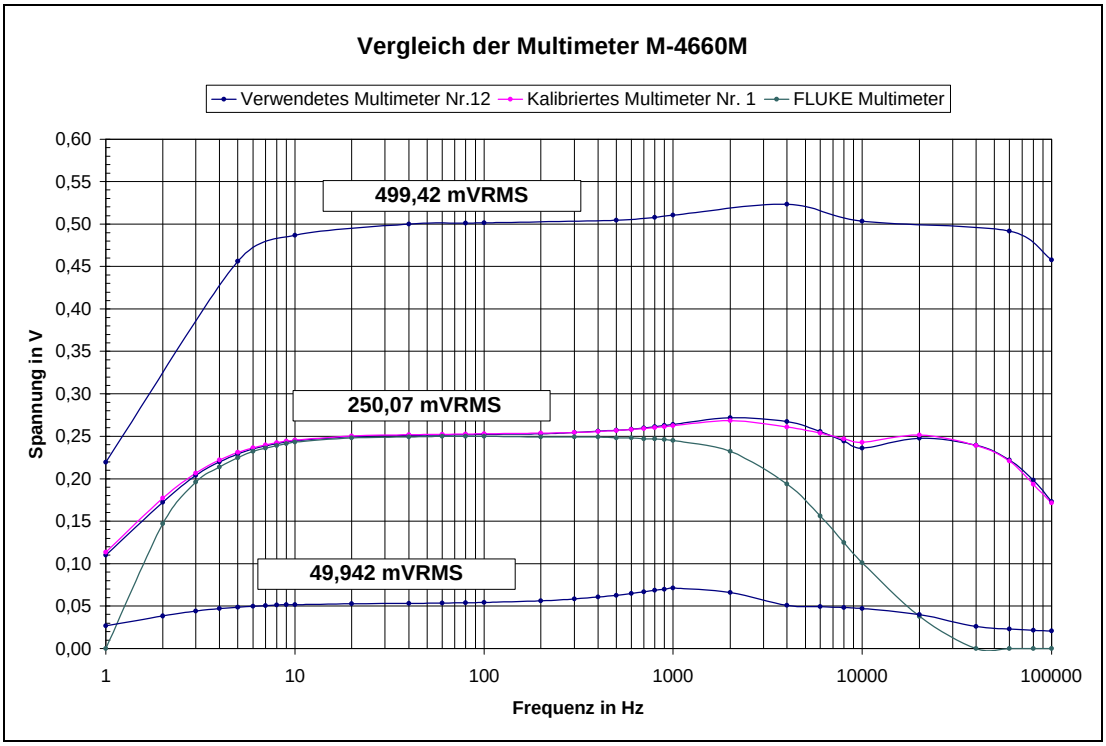


Bild 3.9 Frequenzganganalyse der Multimeter (Sinus; Amplitude = variabel)

Die Frequenzbereiche, in denen das Multimeter mit einem maximalen Fehler von 3% misst, sind in der **Tabelle 3.2** aufgeführt.

Tabelle 3.2 Frequenzganganalyse des verwendeten Multimeters

voreingestellte Spannung	**korrekt gemessener Frequenzbereich (maximale Frequenzabweichung: 3 %)**
499,42 mV	10 - 1000 Hz
250,07 mV	9 – 500 Hz
49,942 mV	5 – 10 Hz

Da die Ausgangssignale der Anemometer meist sogenannte TTL[20] – Signale sind, wurde das Digitalmultimeter auch in Bezug auf die Frequenzgenauigkeit bei solchen Rechtecksignalen überprüft. In diesem Fall wurde mit Hilfe eines Funktionsgenerators der Firma Hewlett Packard (3311A Function Generator) ein Rechtecksignal mit einer

[20] Transistor-Transistor-Logik; Binäres Signal, dem der logischen '1' z.B. 5V und der logischen '0' 0V zugeordnet werden

Amplitude von 5 V generiert. Dieses Signal wurde nun zum Einen mit dem Frequenzanalysator und zum Anderen mit dem DMM aufgenommen. Das Ergebnis dieser Messung ist in **Bild 3.10** dargestellt.

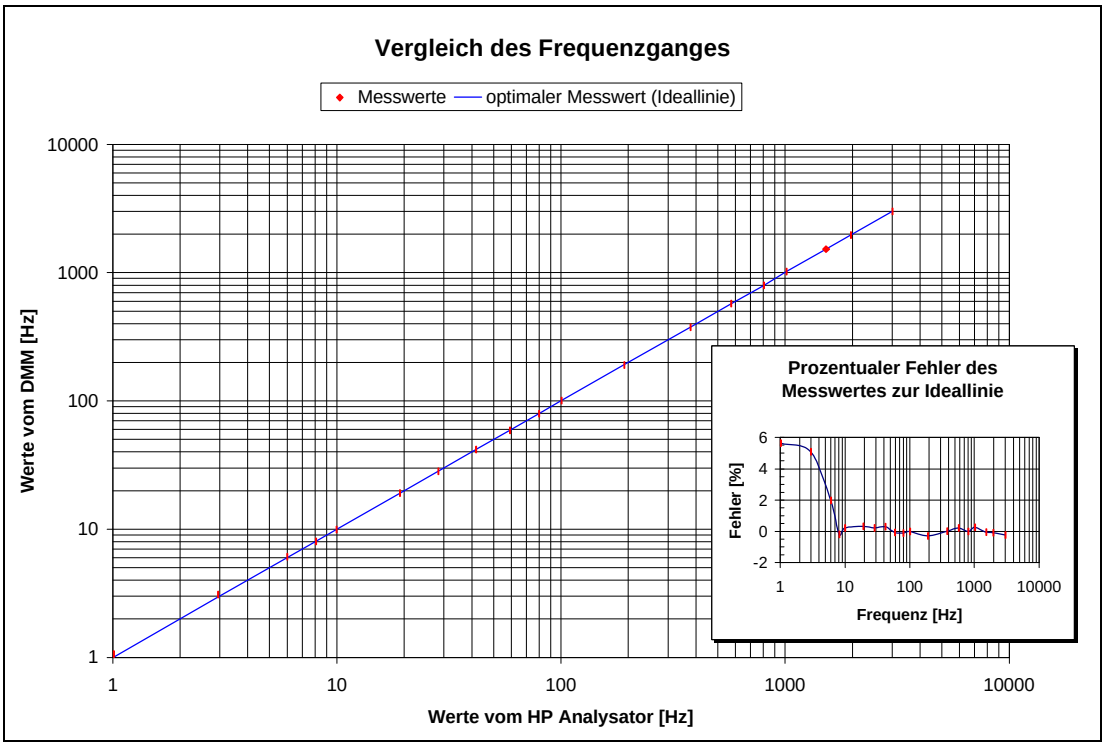


Bild 3.10 Frequenzganganalyse der Multimeter (Rechtecksignal, Amplitude = 5 V)

Das DMM hat eine Displayauflösung von 1 Hz. Durch das Einlesen der Displayanzeige über den Com-Port des PCs und zeitlichem Mitteln konnten auch Zwischenwerte berechnet werden. Diese sind über die Werte des HP Analysators aufgetragen worden. Nach dem Auswerten der Messdaten und dem Erstellen des oben dargestellten Diagramms (**Bild 3.10**) ist in einem Messbereich von 8 bis 3000 Hz mit einer Abweichung von maximal 0,2 % zu rechnen.
Da zum Erstellen der Kalibrierprotokolle die unterste gemessene Frequenz nicht unter 8 Hz liegt (kleinste gemessene Frequenz: 40 Hz), ist hier mit korrekten Messergebnissen zu rechnen.

Einfluss der Anzahl der Mittelungen

Um eine Aussage über die Anzahl der nötigen Mittelungen für die Messungen geben zu können, wurde eine Messreihe mit unterschiedlicher Mittelungszahlen ausgewertet (**Tabelle 3.3**).

Tabelle 3.3 Einfluss der Anzahl der Mittelungen

	21 Mittelungen		10 Mittelungen		5 Mittelungen	
Messwerte in m/s	Gleichanteil	Wechselanteil	Gleichanteil	Wechselanteil	Gleichanteil	Wechselanteil
1	10,06	0,046				
2	10,06	0,046				
3	10,06	0,047				
4	10,06	0,047				
5	10,06	0,047	10,06	0,047		
6	10,06	0,047	10,06	0,047		
7	10,06	0,046	10,06	0,046		
8	10,06	0,046	10,06	0,046	10,06	0,046
9	10,06	0,046	10,06	0,046	10,06	0,046
10	10,05	0,046	10,05	0,046	10,05	0,046
11	10,05	0,047	10,05	0,047	10,05	0,047
12	10,05	0,046	10,05	0,046	10,05	0,046
13	10,06	0,047	10,06	0,047		
14	10,05	0,047	10,05	0,047		
15	10,05	0,047				
16	10,06	0,046				
17	10,05	0,047				
18	10,05	0,046				
19	10,06	0,046				
20	10,05	0,047				
21	10,06	0,047				
Mittelwert	**10,056**	**0,047**	**10,056**	**0,047**	**10,054**	**0,046**

Aus dem Vergleich der Mittelwerte wird ersichtlich, dass bei den vorhandenen Schwankungen eine Anzahl von mindestens 10 Mittelungen notwendig sind.

3.3.6 Prüfung der Digitalmanometer

Die zur Geschwindigkeitsbestimmung gemessenen Drücke wurden mit Digitalmanometern der Firma MECOTEC aufgenommen. Die Manometer wurden mit Hilfe der DMM über den PC ausgelesen und umgerechnet. Zur Prüfung der Anzeigewerte wurden diese mit denen eines Debroscopes[21] verglichen. Die dadurch erzielten Ergebnisse sind in der **Tabelle 3.4** aufgelistet.

[21] Präzisions- Flüssigkeitsmanometer der Firma DEBRO (Meerbusch Germany)

Tabelle 3.4 Vergleichsmessung der Manometer: Debroscope und Mecotec

[-]	[mbar]	[mbar]	[mbar]
Messpunkt Nr.	**Druck Debroscope**	**Druck Mecotec DP 200**	**Differenzdruck**
1	0,050	0,050	0,00
2	0,110	0,110	0,00
3	0,220	0,215	-0,01
4	0,320	0,315	-0,01
5	0,460	0,460	0,00
6	0,610	0,610	0,00
7	0,760	0,760	0,00
8	0,920	0,930	0,01
9	1,060	1,060	0,00
10	1,240	1,245	0,01
11	1,390	1,390	0,00
12	1,680	1,685	0,01

Aus der **Tabelle 3.4** sind nur sehr geringe Abweichungen zu erkennen, sodass man auch hier von der Korrektheit der Messwerte ausgehen kann.

4 Vermessung des Geschwindigkeitsprofils

Vor der Vermessung des Geschwindigkeitsprofils wurden Überlegungen angestellt, ob die gemessenen Ausgangssignale des verwendeten Fiberfilmanemometers korrekt sind. Das Signal des Anemometers ist eine Wechselspannung. Sie wurde mit einem Digitalmultimeter M-4660M der Firma Voltkraft als Gleichanteil und als Wechselanteil aufgenommen.

4.1 Auswertung und Vergleich der Messdaten

4.1.1 Vergleich des Gleichanteiles (Fiberfilm – Prandtlsches Staurohr)

Die mit dem Fiberfilmanemometer gemessene Gleichspannung wurde in einem Messbereich von 0 bis 20 V aufgenommen. Sie entspricht der Strömungsgeschwindigkeit des Windkanals. Die Überprüfung des Fiberfilmausgangssignals mit einem Oszillographen hat gezeigt, dass das Multimeter eine richtige Gleichspannung misst.

Um sich von der Richtigkeit der Geschwindigkeitsmessung zu überzeugen, wurde eine Vergleichsmessung zwischen der Fiberfilmsonde und dem Prandtlschen Staurohr durchgeführt. Dabei wurden die beiden Messgeräte in einem ausreichenden Abstand nebeneinander in die Mitte des Windkanals eingebaut und miteinander verglichen (**Bild 4.1**).

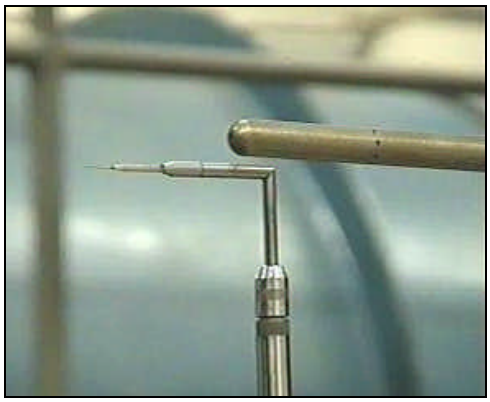


Bild 4.1 Vergleichsmessung: Fiberfilmsonde und Prandtlsches Staurohr

Dieser Vergleich ermöglicht eine Kontrolle über die Messung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit bzw. eine Kontrolle über die Anzeige des Gleichanteiles der mit dem Multimeter gemessenen Spannung (DC V).

Die Messergebnisse sind in der **Tabelle 4.1** zusammengefasst. Die mittlere prozentuale Abweichung zwischen dem Fiberfilmanemometer und dem Prandtlschen Staurohr beträgt –0,13 % und liegt innerhalb der Messgenauigkeit von maximal 1 %.

Tabelle 4.1 Ergebnis der Vergleichsmessung Fiberfilmsonde und Prandtlsches Staurohr

Geschwindigkeit gemessen mit		Abweichung	
Prandtlschem Staurohr in m/s	Fiberfilmsonde in m/s	in m/s	in %
10,08	10,10	-0,02	-0,15
15,08	14,99	0,09	0,62
19,75	19,92	-0,17	-0,86
Quadratischer Mittelwert		**±0,09**	**±0,54**

4.1.2 Vergleich des Wechselanteiles (Fiberfilm – HP-Analysator)

Bild 4.2: Digitalmultimeter

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeits-schwankung wurde ebenso überprüft. Sie wurde als Wechselanteil der Anemometerspannung mit dem Digitalmultimeter (**Bild 4.2**) im Messbereich von 0 bis 2 VAC gemessen. Dieser Bereich wurde verwendet damit die größten Schwankungen, z. B. am Rand der Austrittsdüse, auch mitgemessen werden konnten. Die niedrigen Wechselspannungen im Kernstrahl (Durchmesser min. 400 mm) des Kanals wurden daher in einem zu hohen Messbereich gemessen. Der Messfehler zwischen dem eingestellten Messbereich von 2 VAC und den nächstkleinerem Bereich von 200 mVAC beträgt ca. 30 %.

Um diese Diskrepanz zu untersuchen, wurde mit dem Dynamic Signal Analyzer der Firma Hewlett Packard ein Zeitsignal des Fiberfilmanemometers aus dem Windkanal aufgenommen und mittels Fourieranalyse (FFT) ausgewertet.

Fourieranalyse[22]

Die Fourieranalyse wird durchgeführt, um das Frequenzspektrum einer Zeitfunktion zu ermitteln. Die Fourier-Zerlegung beruht auf dem Prinzip, dass sich jede periodische Funktion als Überlagerung einer Anzahl von Sinus-Funktionen darstellen lässt und eine stochastische Funktion im Allgemeinen in eine Summe unendlich vieler Sinus-Funktionen zerlegt werden kann **[13]**.

[22] Jean Baptiste Joseph Baron de Fourier, französischer Mathematiker und Physiker, * 21. 03. 1768 Auxerre, † 16. 05. 1830 Paris

Aus den aufgenommenen Zeitdaten werden mit Hilfe der FFT die Frequenzkomponenten **f** der reellen Zeitfunktion **A(t)** berechnet **(4.1)**. Dabei ist **k** die Anzahl der Stützstellen eines Zeitfensters der Länge **N**.

$$A(f) = \sum_{k=1}^{N} A(t) \cdot e^{\frac{2\pi \cdot i \cdot f \cdot k}{N}} \quad \textbf{[13]} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Das Ergebnis **A(f)** einer FFT enthält einen Imaginärteil **i** und ist komplex. Multipliziert man diese komplexe Funktion mit seiner konjugiert Komplexen, so erhält man das reelle Leistungsspektrum. Da dieser Wert quadratisch ist, muss aus dem Leistungsspektrum die Wurzel gezogen werden, um das Amplituden- oder Energiespektrum (Auto Power Spektrum APS) zu erhalten:

$$APS = \sqrt{A(f) \cdot A(f)^{-1}} \quad \textbf{[13]} \qquad \textbf{(4.2)}$$

Die FFT-Analysatoren setzen per Menü sämtliche der oben beschriebenen Gleichungen in Diagramme um **[13]**. Die so mit Hilfe des HP-Analysators erhaltene APS-Spektren, bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten im Windkanal, wurden analysiert. Aus dem APS-Spektrum lässt sich die Amplitude des Gleich- und des Wechselanteiles des Fiberfilmsignals bestimmen.

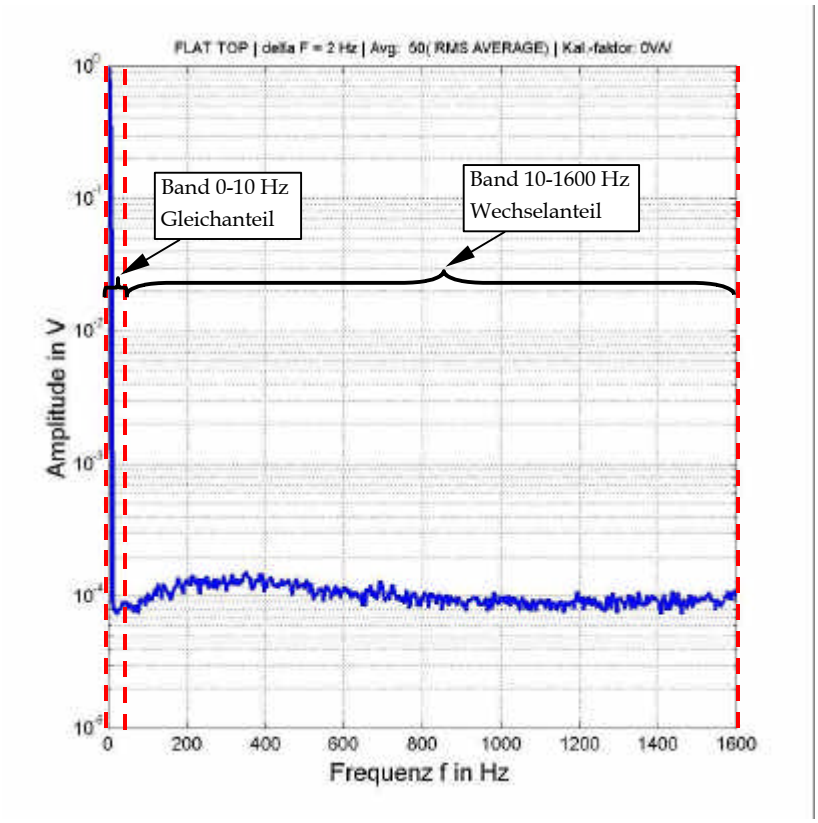


Bild 4.3 Mit dem HP-Analysator aufgenommenes APS-Spektrum

Das **Bild 4.3** stellt das mit dem HP-Analysator aufgenommene APS-Spektrum des Fiberfilmanemometers im Windkanal bei 10 m/s dar.

Der Gleichanteil der zu messenden Spannung wurde im Zeitbereich als RMS-Wert mit dem DMM bestimmt. Per Definition ist die Amplitude des Gleichanteiles im Frequenzspektrum bei 0 Hz definiert. Aufgrund der endlichen Frequenzauflösung (hier z.B. 2 Hz) ist der Wert für den Gleichanteil bei 0 Hz energetisch nicht vollständig. Daher wurde versucht, den Gleichanteil in einem Band von 0-10 Hz zu berechnen. Dort befindet sich die gesamte Energie des Gleichanteilpeaks. In diesem Fall wurden aber gleiche Werte bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ermittelt. Das steht im Widerspruch zu der Tatsache, dass der Gleichanteil der gemessenen Spannung mit der Geschwindigkeit steigt. Daher wurde auf die Bestimmung des Gleichanteiles mit dem HP-Analysator verzichtet und lediglich der Wechselanteil in einen experimentell ermittelten Band von 10-1600 Hz bestimmt. In diesem Bereich sind keine Gleichanteile des Signals mehr zu verzeichnen. Es wurde kein nach oben hin größerer Frequenzbereich gewählt, da sich kaum energetische Amplituden außerhalb dieses Bandes befinden. Außerdem sinkt bei einer Vergrößerung des Frequenzbereiches die Auflösung.
Der Wechselanteil wurde sowohl mit dem DMM im Messbereich bis 2 VAC als auch mit dem HP-Analysator bestimmt. Die sich daraus ergebenden Turbulenzgrade wurden ausgerechnet und miteinander verglichen. In der **Tabelle 4.2** sind die Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen dem DMM und dem HP-Analysator im Windkanal bei 10 m/s mit und ohne dem Turbulenzerzeuger (im Weiteren auch Turbulenzsieb genannt) dargestellt. Der Turbulenzerzeuger ist im **Kapitel 6.5** näher beschrieben.

Tabelle 4.2 Vergleichsmessung zwischen dem DMM und dem HP-Analysator

	Geschwindigkeit	**Schwankung**		**Turbulenzgrad**		**Abweichung**
	Multimeter	Multimeter	HP-Analysator	Multimeter	HP-Analysator	**Turbulenz**
	c in m/s	c'_{DMM} in m/s	c'_{HP} in m/s	Tu_{DMM} in %	Tu_{HP} in %	Fehler in %
Messung ohne Sieb	5,026	0,031	0,014	0,609	0,282	116
	10,009	0,097	0,015	0,971	0,146	565
	15,082	0,280	0,026	1,857	0,171	986
	Mittelwert			**0,899**	**0,198**	**556**
Messung mit Sieb	5,157	0,388	0,283	7,532	5,481	37
	9,831	0,932	0,771	9,483	7,840	21
	15,140	1,324	1,426	8,745	9,419	-7
	Mittelwert			**8,587**	**7,580**	**17**

Bei der Messung ohne das Turbulenzsieb ist der sich aus der Berechnung mit den Multimeterdaten ergebende Turbulenzgrad um ca. das Fünffache größer, als der Turbulenzgrad laut HP-Analysator. Wenn man die Werte von der Messung mit dem Turbulenzsieb betrachtet, stellt man fest, dass hier der Fehler nur ca. 17 % der Multimeteranzeige beträgt. Aus den in der **Tabelle 4.3** dargestellten Ergebnissen folgt, dass die Multimeter bei niedrigen Wechselspannungen ungenau (zu viel) anzeigen.

Die hier beschriebenen Überlegungen wurden leider nach dem Vermessen des ersten Geschwindigkeits- und Turbulenzprofils des Windkanals im Urzustand angestellt. Die Messdaten zur Beurteilung des Winkanalzustandes vor dem Umbau sind daher verlorengegangen. Die im **Kapitel 4.3** beschriebenen dreidimensionalen Profile stimmen aber tendenziell. Die Berechnung des Turbulenzgrades im Kernstrahl vor dem Umbau des Windkanals (siehe **Kapitel 5**) wurde auf ca. 1 % geschätzt und nach dem Umbau dementsprechend auf 0,2 % verbessert.

Um deutlich zu machen, welcher Turbulenzgrad nun tatsächlich im Windkanal herrscht, wurden zusätzlich die Fiberfilmmessungen mit den Ultraschallmessungen verglichen. In der **Tabelle 4.3** ist noch mal der Turbulenzgrad mit dem DMM und dem HP-Analysator berechnet worden. Zusätzlich sind die Messergebnisse der beiden untersuchten Anemometer der Firma METEK und GILL aufgeführt.

Tabelle 4.3 Diskrepanzen bei der Messung des Turbulenzgrades

	Turbulenzgrad in %	
Messmethode	**ohne das Sieb**	**mit dem Sieb**
Fiberfilmanemometer ausgewertet mit DMM und PC	2 bis 3	8
Fiberfilmanemometer ausgewertet mit dem HP-Analysator (AC) und DMM (DC)	0,2	6
Ultraschallanemometer der Firma METEK	4	6
Ultraschallanemometer der Firma GILL	0,5	2

Die Messungen mit den Ultraschallanemometern haben gezeigt, dass auch hier große Unterschiede bei der Bestimmung des Turbulenzgrades existieren.
Das Ultraschallanemometer berechnet den Turbulenzgrad aus den Standardabweichungen der Geschwindigkeiten. Dieser Wert ist stark von der Abtastrate des Anemometers abhängig. Das Anemometer der Firma METEK hatte eine Abtastrate von 10 Hz. Das Ultraschallanemometer der Firma GILL hat nur mit 1 Hz abgetastet. Wahrscheinlich waren diese Abtastraten zu klein, um den genauen Wert der Turbulenz zu bestimmen.

4.2 Vorgehensweise bei der Vermessung

Das Geschwindigkeitsprofil des Windkanals wurde mit Hilfe der Fiberfilmmesstechnik vermessen. Wie im **Kapitel 3.2** beschrieben, wurden die Messpunkte in Anlehnung an das Schwerelinienverfahren ausgewählt und mit Hilfe eines speziell dafür geschriebenen Visual Basic Programms angesteuert. Das Geschwindigkeitsprofil wurde unmittelbar nach dem Austritt und in den Abständen von 30 und 60 cm gemessen. Dabei wurde die Geschwindigkeit von 5 m/s bis 20 m/s in 5 m/s-Schritten variiert.

4.3 Auswertung der Messdaten

Die Ausgangsspannung des Anemometers wurde ebenfalls mit dem obenerwähnten Programm (siehe Anhang) als Gleich- und Wechselspannung aufgenommen und gemittelt.

4.3.1 Dreidimensionale Darstellung des Geschwindigkeitsprofils mit MATLAB

Die aufgenommenen Messwerte der beiden Strömungshalbprofile (siehe **Kapitel 3**) wurden mit Hilfe von einem Excel-Makro zu einem Vollprofil zusammengefasst und als eine Textdatei zur Verwendung unter MATLAB abgespeichert. Ein vorhandenes MATLAB Programm **[5]** wurde für die vorliegenden Werte leicht verändert. Es wurde zum Beispiel festgestellt, dass nach der Spline-Interpolation über den Radius die von MATLAB berechneten Werte für den Turbulenzgrad teilweise negativ waren, obwohl hier nur positive Messwerte vorlagen. Aus diesem Grund wurde von der Spline-Interpolation abgesehen und stattdessen eine lineare Interpolation zwischen den Messwerten verwendet (**Bild 4.4**).

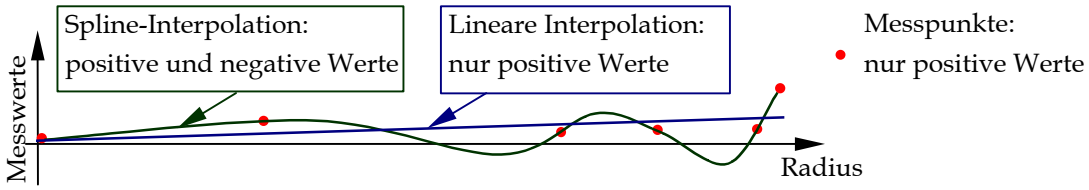
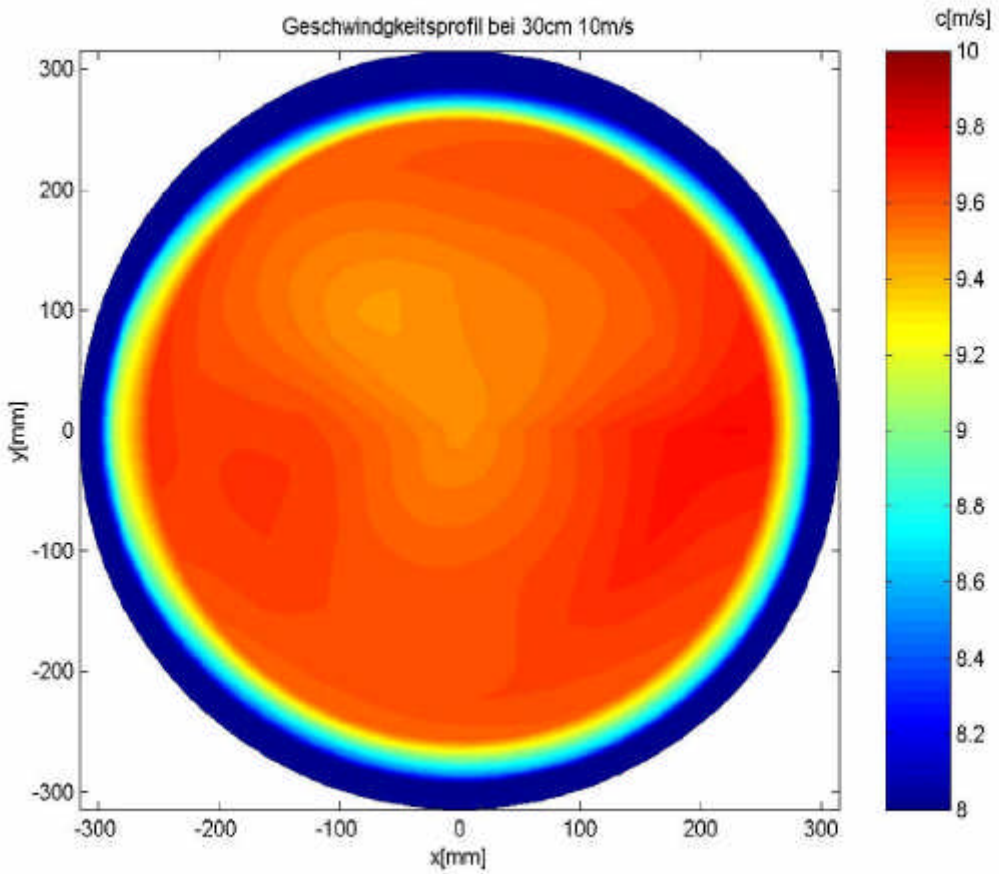
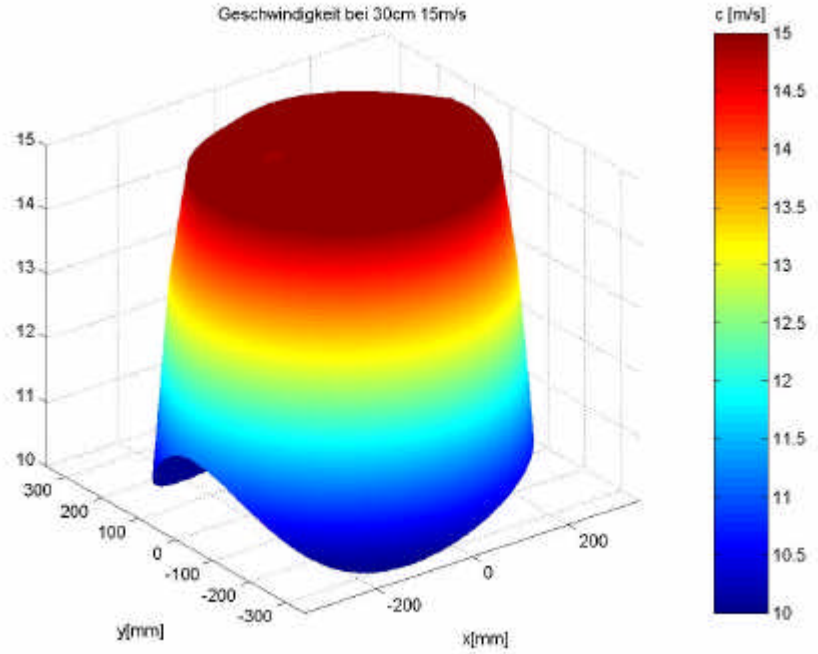


Bild 4.4 Schematische Darstellung der Spline- und der linearen Interpolation

Es wurden sieben Punkte verteilt auf dem Radius im Winkel von 45° gemessen und mit 100 Stützstellen über den Radius und mit einem Grad Auflösung über den Umfang interpoliert. Die **Bilder 4.5a** und **b** zeigen die dreidimensionale Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung im Windkanal vor dem Umbau.



a) Draufsicht



b) Räumliche Darstellung

Bild 4.5 Dreidimensionale Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung bei 15 m/s und 30 cm nach dem Austritt

Im **Bild 4.6** sind Halbschnitte durch die Geschwindigkeitsverteilung bei unterschiedlichen Winkel dargestellt. Diese Messung erfolgte bei 10 m/s unmittelbar nach dem Austritt.

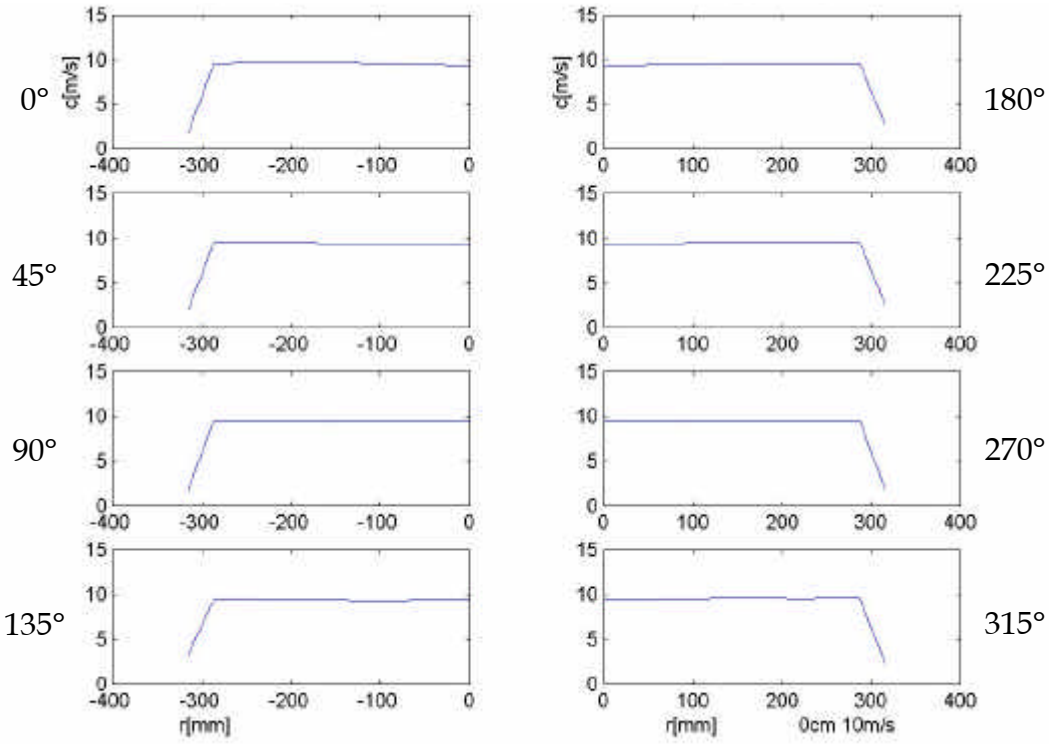


Bild 4.6 Halbschnitte durch die Geschwindigkeitsverteilung

In dieser Darstellung sieht man deutlich, dass die Geschwindigkeit in dem Bereich des gesamten Düsenradius von 300 mm konstant bleibt. Die Tatsache, dass bei unterschiedlichen Winkeln die Halbschnitte der Geschwindigkeit identisch sind, spricht für die Gleichmäßigkeit des Geschwindigkeitsprofils.

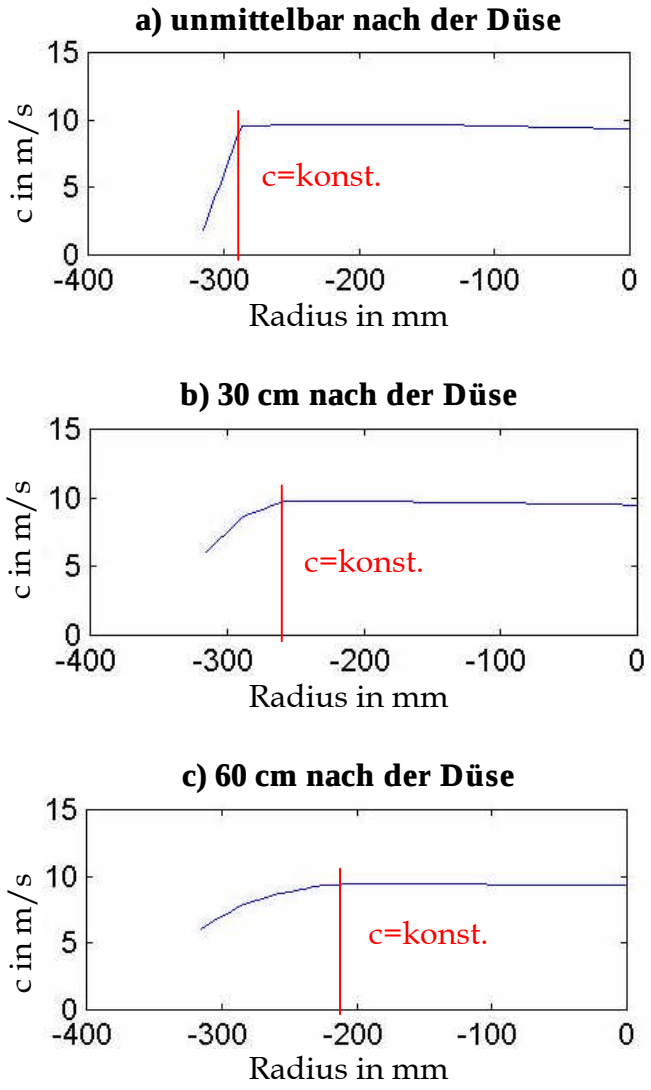


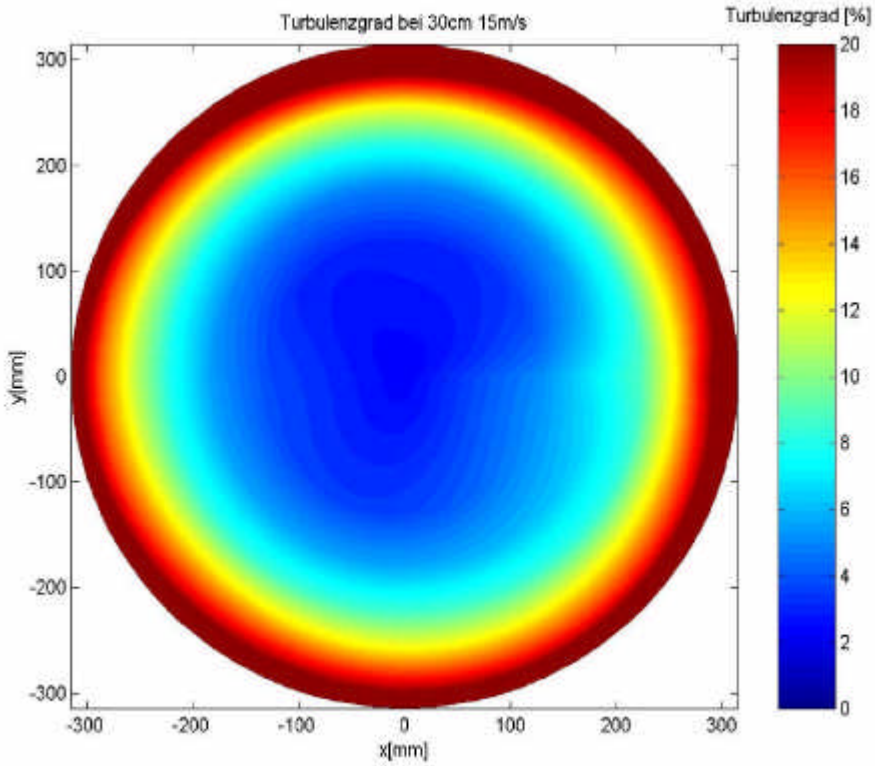
Bild 4.7 Halbschnitte durch die Geschwindigkeitsverteilung bei 10 m/s und bei unterschiedlichen Abständen nach der Austrittsdüse

Betrachtet man die Halbschnitte der gleichen Geschwindigkeit und unterschiedlichem Abstand nach dem Austritt, so stellt man fest, dass mit zunehmenden Abstand nach der Düse sich der Bereich mit der konstanten Geschwindigkeit verkleinert. Im **Bild 4.7** sind solche Halbschnitte der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Abständen nach der Austrittsdüse bei 10 m/s dargestellt. So beträgt zum Beispiel der Radius mit einer konstanten Geschwindigkeit ca. 280 mm unmittelbar nach der Düse (**Bild 4.7a**) und nur noch ca. 220 mm im Abstand 60 cm nach der Düse (**Bild 4.7c**).

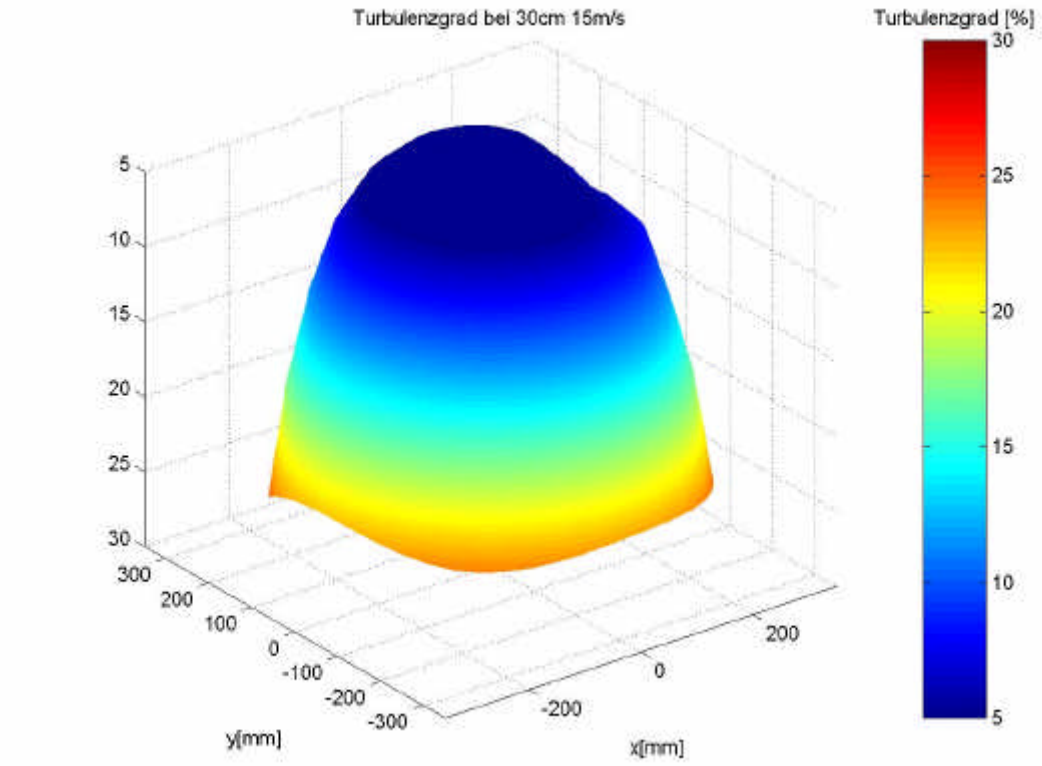
Da das größte zu kalibrierende Schalenkreuzanemometer einen Radius von 150 mm besaß und in der Mitte des Windkanals eingebaut wurde, befanden sich alle Anemometer auf jeden Fall in dem Bereich der konstanten Anströmung.

4.3.2 Auswertung der Turbulenz und der Geschwindigkeitsschwankung

Ähnlich wie die Geschwindigkeitsverteilung wurde die Turbulenzverteilung mit MATLAB berechnet. Die **Bilder 4.8a** und **b** zeigen die dreidimensionale Darstellung der Turbulenz im Windkanal vor dem Umbau.



a) Draufsicht



b) Räumliche Darstellung

Bild 4.8 Dreidimensionale Darstellung der Turbulenzverteilung bei 15 m/s und 30 cm nach dem Austritt

Im Gegensatz zu der räumlichen Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung bei 15 m/s (**Bild 4.5**), ist die Darstellung der Turbulenz anders. Hier gibt es keinen Bereich mit konstantbleibenden Werten. Auf dem Radius von 150 mm z.B. steigt der Turbulenzgrad „parabelförmig“ von ca. 1 % auf 5 % an. Weitere räumliche Darstellungen der Geschwindigkeitsverteilung und der Turbulenz findet man im Anhang.
In den folgenden Bildern (**Bild 4.9a** und **4.9b**) ist die Turbulenzverteilung vor und nach dem Umbau in der Mitte des Windkanals bei 10 m/s dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen das der Turbulenzgrad vor dem Umbau auf der rechten mittleren Seite eine erhöhte Turbulenz von über 5 % aufzeigt. Nach dem Umbau ist diese Turbulenzerhöhung nicht wieder aufgetreten. Diese beschriebene Optimierung ist über den gesamten Geschwindigkeitsbereich erzielt worden. Weitere dreidimensionale Darstellungen der Geschwindigkeit und Turbulenz sind im Anhang hinterlegt.

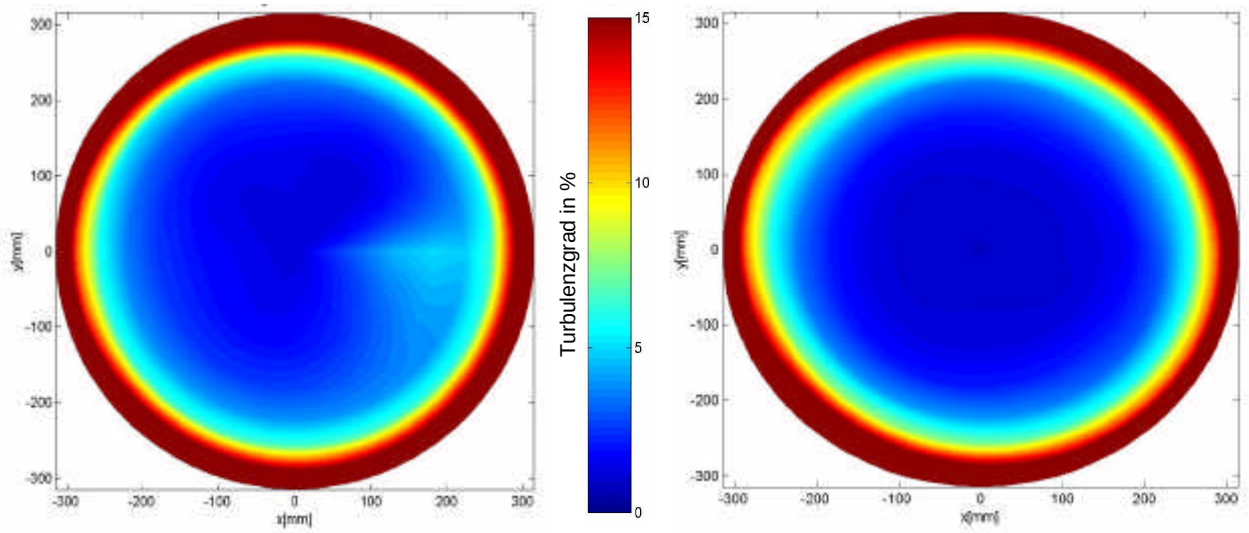


Bild 4.9a Turbulenzverteilung **vor** dem Umbau bei 10 m/s in der Mitte des Windkanals

Bild 4.9b Turbulenzverteilung **nach** dem Umbau bei 10 m/s in der Mitte des Windkanals

Der Turbulenzgrad wurde in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und dem Abstand vom Austritt untersucht. Dies geschah einmal vor und einmal nach dem Umbau. Dazu wurden die für die Vermessung des Turbulenzprofils aufgenommenen Werte bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Düsenabständen im Kernstrahl gemittelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im **Bild 4.10** dargestellt.

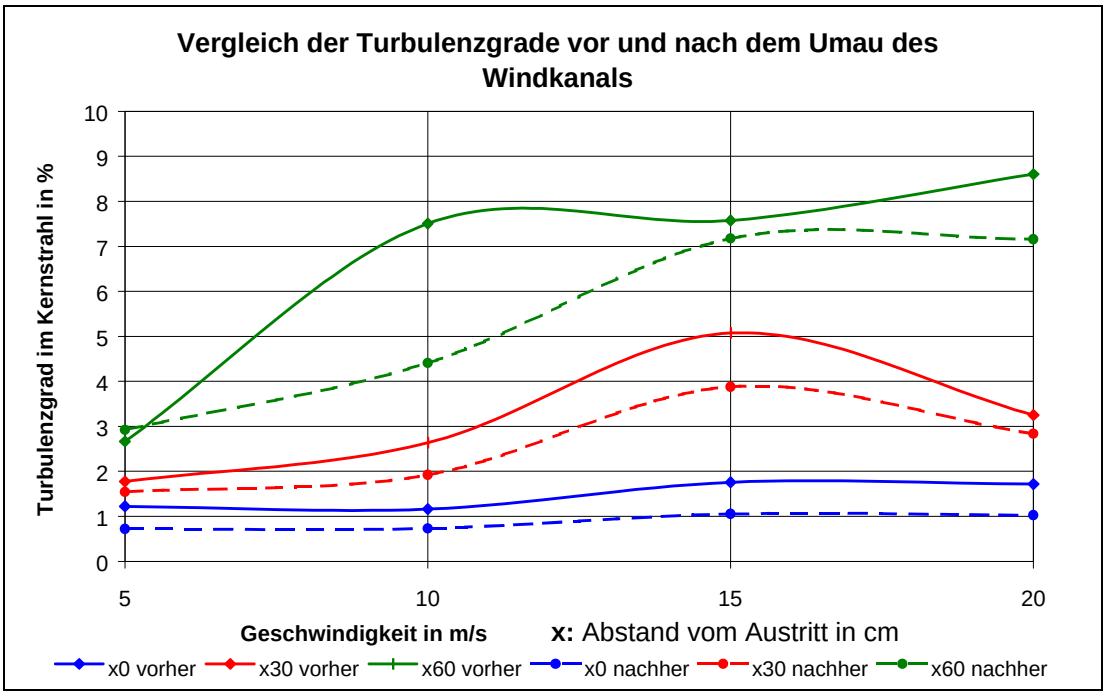


Bild 4.10 Turbulenzgrad im Kernstrahl vor und nach dem Umbau

Auch dieses Diagramm stimmt nur qualitativ. Der richtige mit dem HP-Analysator bestimmte Wert des Turbulenzgrades beträgt in der Mitte des Windkanals bei 10 m/s 0,2 Prozent. Aus dem **Bild 4.10** ist deutlich zu erkennen, dass der Turbulenzgrad mit der Geschwindigkeit und mit dem Abstand nach dem Austritt steigt. Außerdem ist eine Abnahme des Turbulenzgrades nach dem Umbau festzustellen. Das ist bei den höheren Geschwindigkeiten ganz deutlich zu sehen. Hier wurde im Mittel eine Verbesserung um 0,8 Prozentpunkte erzielt.

Bei einem Düsenradius größer 220 mm sind 60 cm nach dem Austritt viele Ablösungen von der Düsenkante zu verzeichnen. Deshalb wurde der Turbulenzgrad für eine bestimmte Geschwindigkeit im Kernstrahl (Radius ca. 220 mm) durch die Mittelung einzelner Messwerte berechnet. So beträgt der Turbulenzgrad bei einer Geschwindigkeit von 10 m/s in der Mitte der Messstrecke 1 %.

Auch die Schwankung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit wurde ähnlich wie der Turbulenzgrad im Kernstrahl berechnet. Die Geschwindigkeitsschwankung im Kernstrahl beträgt bei 10 m/s in der Mitte der Messstrecke 0,5 %.

Die entsprechenden Tabellen für die Berechnung oben beschriebener Werte sowie die Berechnung weiterer Turbulenzgrade und Abweichungen findet man im Anhang unter: **Mittelung der Geschwindigkeit**.

4.4 Querkomponentenmessung mit der 5-Loch Kegelsonde

Um die Geschwindigkeitskomponenten quer zur Hauptströmungsrichtung zu messen, wurde eine 5-Loch Kegelsonde der „Aerodynamischen Versuchsanstalt (AVA) Göttingen“ verwendet (**Bild 4.11a**). Die Funktionsweise dieser Sonde ist ausführlich in **Kapitel 1.1** beschrieben. Die Sonde besitzt sechs Druckanschlüsse (**Bild 4.11b**). Ein Paar misst die Drücke für die Ermittlung der Geschwindigkeitskomponente $\mathbf{c_y}$, ein weiteres Paar ist für die Ermittlung der Geschwindigkeitskomponente $\mathbf{c_z}$ zuständig. Die letzten beiden Druckanschlüsse messen den Staudruck und den statischen Druck für die Bestimmung der Hauptströmungsgeschwindigkeit.

Bild 4.11a: 5-Loch Kegelsonde

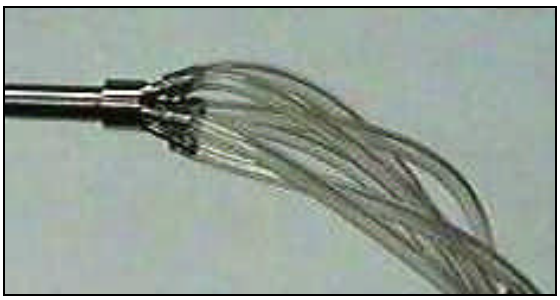


Bild 4.11b: Druckanschlüsse der 5-Loch Kegelsonde

Die Sonde wurde an dem Koordinatentisch befestigt und zu sieben Messpunkten gefahren (**Bild 4.12**). Die Messpunkte befinden sich sowohl nah an dem Düsenmittelpunkt, als auch ganz weit außen, nahe dem Düsenrand.

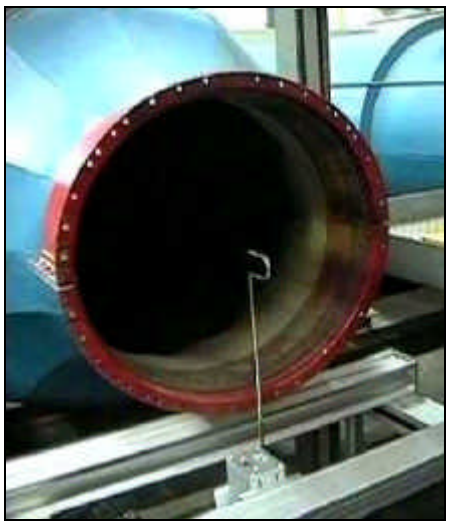


Bild 4.12 Versuchsaufbau zur Vermessung der Querkomponente

Diese unterschiedlichen Positionen sind bewusst so gewählt, damit der Einfluss der Verwirbelungen an der Düsenkante deutlich wird.

Die Sonde wurde in dem Mittelpunkt der Windkanaldüse so ausgerichtet, dass keine Querkomponenten damit gemessen wurden. Die Druckdifferenzen der beiden Anschlüsse der Komponente $\mathbf{c_y}$ und der Komponente $\mathbf{c_z}$ sind dann gleich null. Die Messergebnisse, die unter dieser Voraussetzung bei einer Hauptanströmung von 10 m/s nahe der Düse entstanden sind, werden in **Bild 4.13** dargestellt.

Dieses Bild zeigt, dass der Mittelwert der Querkomponente $\mathbf{c_{yz}}$ 0,20 m/s beträgt: das macht 2 % der Hauptströmungsgeschwindigkeit aus. Die größte Querkomponente $\mathbf{c_{yz}}$ (der rote Pfeil) beträgt 0,44 m/s das sind 4,4 % der Hauptströmungsgeschwindigkeit.

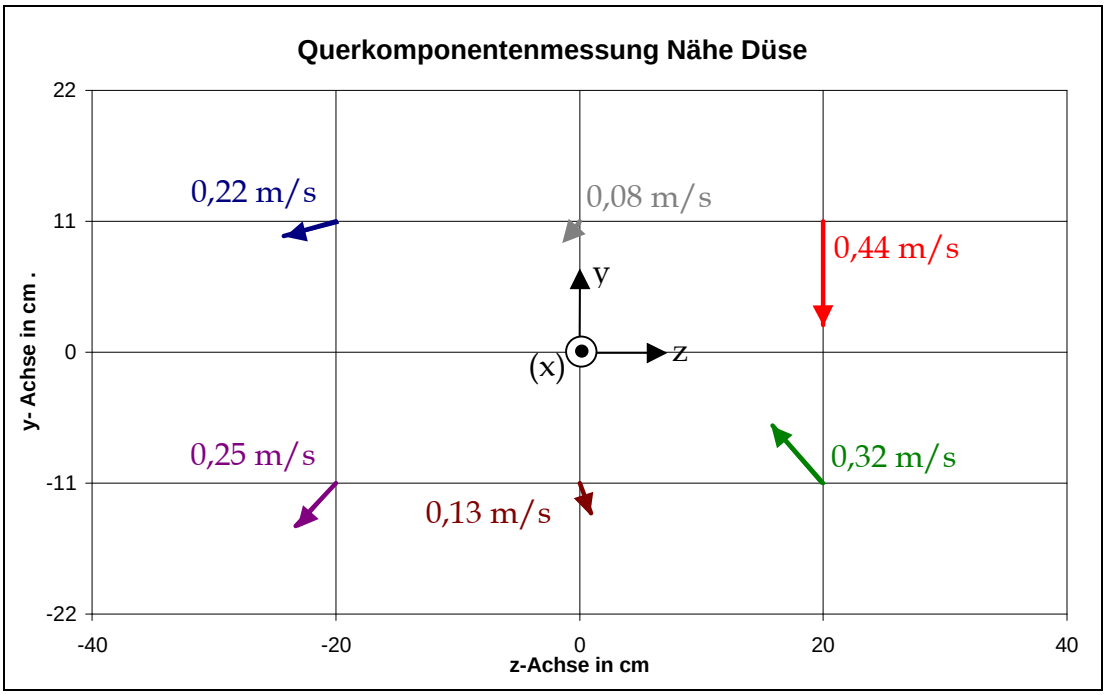


Bild 4.13 Querkomponente $\mathbf{c_{yz}}$ bei einer Hauptanströmung von 10 m/s nahe der Düse

Aus **Bild 4.13** ist weiterhin zu erkennen, dass die Querkomponenten nahe dem Düsenrand deutlich größer sind, als die Querkomponenten nahe des Düsenmittelpunkts. Diese Darstellung weist auf keine bestimmte Tendenz oder Regelmäßigkeit hin. Es ist auch kein Einfluß von dem Gebläse vorhanden (Drall), da die Pfeile keine zirkulierende Strömung darstellen.

4.5 Vermessung des Kernstrahlwinkels

Um zu erfahren, in welchem Bereich der Messstrecke die Strömungsgeschwindigkeit konstant bleibt, wurde der Kernstrahlwinkel bestimmt. Im **Bild 4.14** ist die Strömungsausbreitung nach der Austrittsdüse des Windkanals mit dem dazugehörigen Freistrahl mit Kern (Kernstrahl) und dem Kernstrahlwinkel von 6° dargestellt. Der Kernstrahl ist ein kegelförmiger Bereich, in dem die Geschwindigkeit überall gleich der Düsenaustrittsgeschwindigkeit ist.

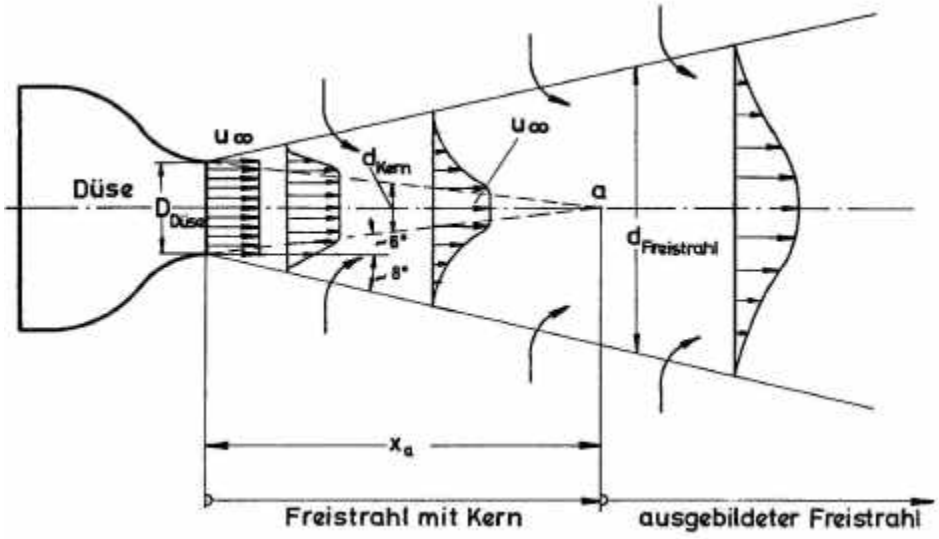


Bild 4.14 Das Strömungsfeld eines Freistrahles **[12]**

Für die Berechnung des Kernstrahls wurden die mit MATLAB erstellten Halbschnitte durch die Geschwindigkeitsverteilung an den unterschiedlichen Positionen nach der Düse (**Bild 4.7**) betrachtet. Aus diesen Abbildungen wurde der Radius mit der konstanten Geschwindigkeit abgelesen und über dem Abstand Strom ab in **Bild 4.15** aufgetragen.

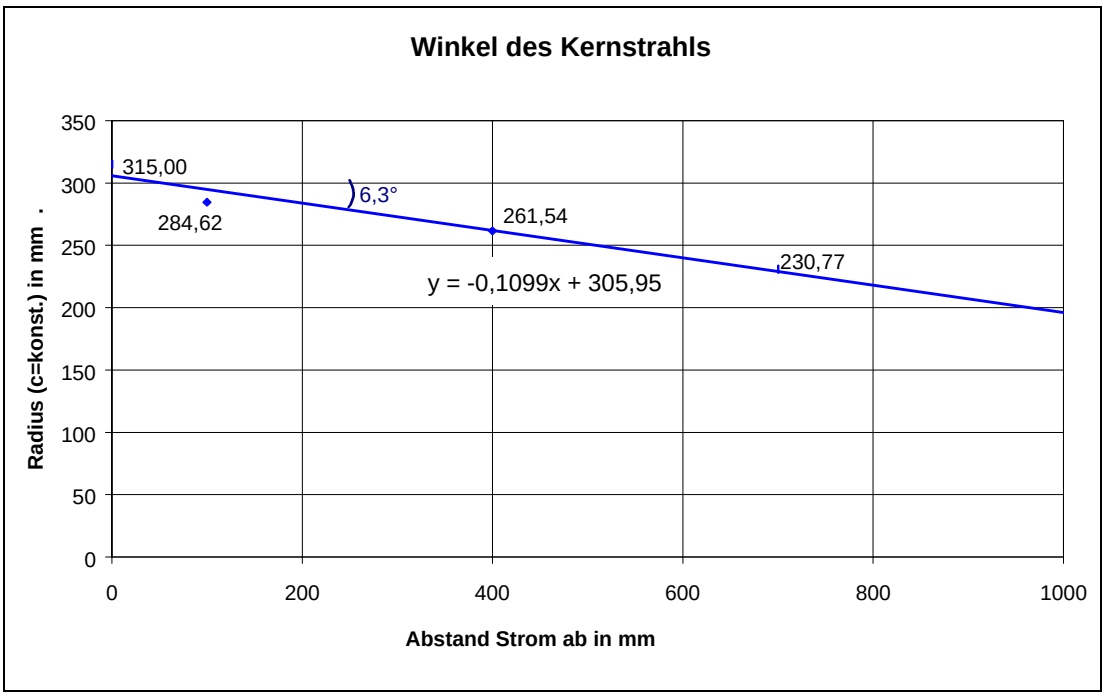


Bild 4.15 Berechnung des Kernstrahlwinkels

Mit Hilfe einer Trendlinie wurde der Winkel 6,3° mit dem ARCUS TANGENS der Steigung bestimmt.

5 Umbau des Windkanals

5.1 Beschreibung und technische Daten des Windkanals

Der Windkanal „Göttinger Bauart“ (Baujahr 1968) des Institutes für Strömungsmaschinen der FH Düsseldorf ist schematisch im **Bild 5.1** dargestellt. Es ist ein Unterschallwindkanal mit offener Messstrecke.

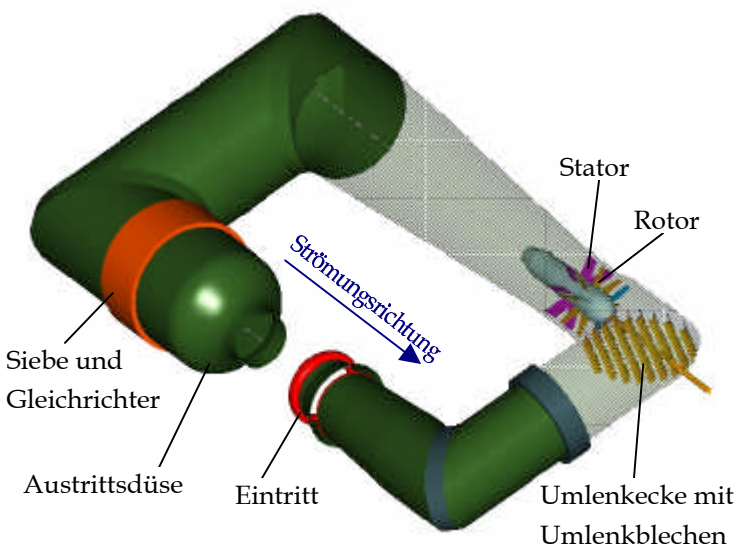


Bild 5.1 Windkanal Göttinger Bauart

Windkanäle Göttinger Bauart haben einen geschlossenen Kreislauf. Der aus der Düse austretende Strahl wird vom Gebläse wieder angesaugt. Der Gebläseantrieb muss nur die diversen Strömungsverluste decken. Die Messstrecke kann offen oder geschlossen sein **[12]**.

Technische Daten des Windkanals [11]:

Düsendurchmesser	600 mm
Kontraktionsverhältnis[23]	4,98
Maximale Messstreckenlänge	1200 mm
Maximale Geschwindigkeit im Strahl	50 m/s
Maximale Totaldruckerhöhung	11 mbar
Maximaler Volumenstrom	14 m^3/s
Gebläse	Einstufiges Axialgebläse, drehzahlgeregelt
Antriebsmotor	Gleichstrommotor 23 kW, 2100 min^{-1} maximal

[23] Kontraktionsverhältnis ist das Verhältnis der Eintrittsfläche zu der Austrittsfläche der Düse. Kontraktionsverhältnisse von Windkanälen liegen in der Regel zwischen 4 und 6, in Sonderfällen bis zu 18.

5.2 Windkanaleinbauten

Windkanaleinbauten sind Vorrichtungen, die in Windkanäle einbaut werden, um das Geschwindigkeitsprofil zu vergleichmäßigen und die turbulenten Schwankungen zu dämpfen. Die Kanaleinbauten erhöhen allerdings die Strömungsverluste.

5.2.1 Windkanaldüse

Die Windkanaldüse hat die Aufgabe, die Luftströmung auf die nötige Geschwindigkeit zu beschleunigen. Dabei verringern sich die turbulenten Längsschwankungen mit dem Kontraktionsverhältnis. Im Gegensatz zu Geschwindigkeitsunterschieden in Strömungsrichtung, werden Geschwindigkeitskomponenten quer zur Strömungsrichtung häufig durch die Düse verstärkt **[1]**.
Weiterhin wird durch die Senkung der Grenzschichtdicke am Düsenaustritt eine Strömung mit annähernd konstantem Druck- und Geschwindigkeitsprofil erreicht **[12]**.

5.2.2 Beruhigungssiebe

Beruhigungssiebe bestehen meistens aus einem Drahtgewebe und werden im Windkanal vor der Düse eingebaut. Auch Siebe gleichen Geschwindigkeitsunterschiede in Strömungsrichtung auf die gleiche Weise wie die Düse aus. Auf die Geschwindigkeitskomponente quer zur Strömungsrichtung wirkt ein Sieb dämpfend. Außerdem verhindern Siebe, dass Schmutzpartikel in die Messstrecke gelangen.

5.2.3 Flies

Ein Flies hat ähnliche Eigenschaften wie ein Sieb. Das Flies hat eine sehr feine Struktur, deshalb werden die Geschwindigkeitsschwankungen besonders gut gedämpft. Es erhöht allerdings dadurch den Anlagenwiderstand, sodass die Strömungsverluste steigen.

5.2.4 Gleichrichter

Um Geschwindigkeitskomponenten quer zur Strömungsrichtung zu dämpfen, z.B. einen vom Ventilator herrührenden Drall oder Sekundarströmungen aufgrund von Umlenkungen, wird vor den Sieben ein Gleichrichter eingebaut. Er besteht meistens aus mehreren wabenartig zusammengesetzten Blechen. Sie verringern in gewissem Maße Geschwindigkeitsunterschiede in Strömungsrichtung, jedoch meist geringer als Siebe **[1]**.

5.3 Optimierung

Die Vermessung des Geschwindigkeitsprofils des Windkanals mit der Fiberfilmsonde ergab einen Turbulenzgrad von ca. 1 %. Da für die erfolgreiche Kalibrierung der Anemometer ein niedrigerer Turbulenzgrad erforderlich ist, sollte dieser Zustand durch den Umbau des Windkanals verbessert werden.

Die Änderungen konnten am Gleichrichter, den Sieben, der Umlenkecke vor dem Austritt und am Rotor durchgeführt werden.

5.3.1 Veränderungen am Gleichrichter und den Sieben

Bild 5.2 Ausbau der Austrittsdüse. mit zwei Hubkränen

Um die Veränderungen am Gleichrichter und den Sieben durchzuführen, musste die Austrittsdüse abgebaut werden (**Bild 5.2**).

Anschließend wurde die Einheit mit den beiden Sieben herausgenommen. Es befanden sich große Mengen Staub- und Schmutzpartikel vor dem Sieb (**Bild 5.3**). Diese Verschmutzungen erhöhen den Anlagenwiderstand und senken die Leistung des Windkanals.

Bild 5.3 Staub und Schmutzpartikel vor dem Sieb

Der Schmutz wurde mit Hilfe eines Industriesaugers und Druckluft entfernt.

Zur Verbesserung der Strömungseigenschaften wurde zwischen den beiden Sieben ein weiches Flies als Filter eingebaut (**Bild 5.4**).

Nach neuen Erkenntnissen verbessert der Gleichrichter die Turbulenz nur in geringem Maße. Außerdem kann man davon ausgehen, dass der Drall vom Ventilator nach dem Durchlaufen des Leitrades (Stator) und zweier Umlenkecken kaum vorhanden ist. Deshalb wurde auf den Wiedereinbau des Gleichrichters ganz verzichtet.

Bild 5.4 Das eingebaute Flies

5.3.2 Veränderungen an den Umlenkschaufeln

An den Stellen, an denen die Strömung eine Richtungsänderung erfahren soll, werden Umlenkschaufeln eingebaut. Sie verhindern die Ablösung und Verwirbelung in den Kanalecken **[12]**.
Zur Strömungsverbesserung wurden zur Probe die Umlenkschaufeln in der letzten Ecke vor dem Austritt verlängert. Dafür sind vier 20 cm breite Verlängerungsbleche zur Probe an die Umlenkschaufeln befestigt worden. Diese Veränderung sollte die turbulenten Anteile in der Hauptströmungsrichtung verringern.
Zuerst wurde versucht, optisch mit Hilfe von eingeklebten Wollfäden die Turbulenz zu beurteilen. Das Turbulenzverhalten von den Umlenkschaufeln mit und ohne Probebleche war optisch nicht zu unterscheiden. Auch der Vergleich der aufgenommenen Videosequenzen hat keine eindeutige Tendenz gezeigt.

Um eine genauere Aussage über die Änderung der Turbulenz machen zu können, wurden an zwei Punkten hinter den verlängerten Umlenkblechen Turbulenzmessungen mit dem Fiberfilmanemometer durchgeführt (**Bild 5.5**).

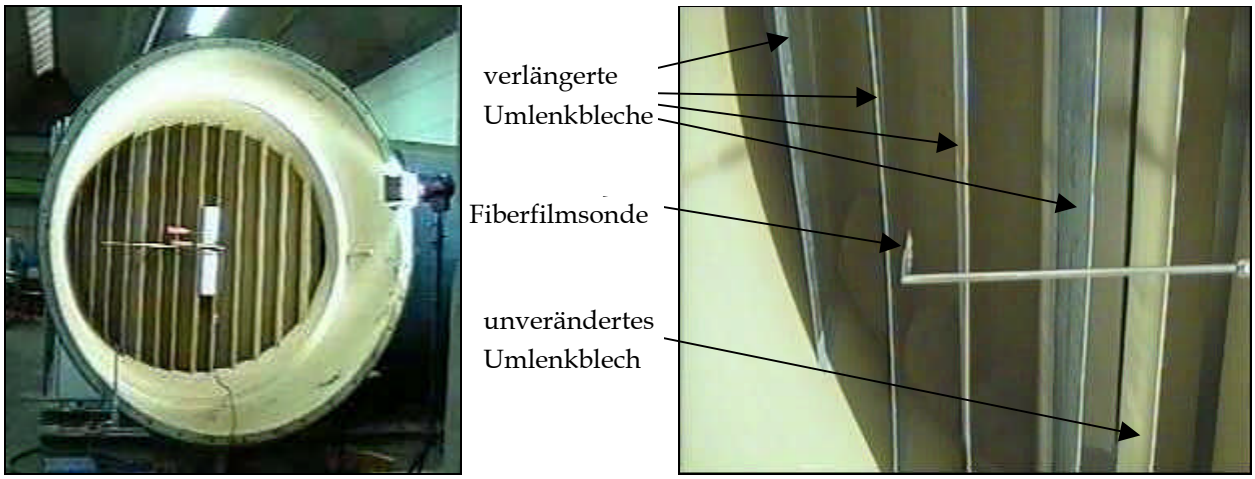


Bild 5.5 Turbulenzmessungen mit dem Fiberfilmanemometer hinter den verlängerten Umlenkblechen

Die Messungen des Turbulenzgrades mit und ohne Verlängerungsblechen hat gezeigt, dass der Einbau solcher Bleche unnötig ist. Der Turbulenzgrad ohne Probebleche war geringer, als der Turbulenzgrad mit den eingebauten Blechen (**Tabelle 5.1**). Dies ist vermutlich auf das Schwingen der verlängerten Bleche zurückzuführen.

Tabelle 5.1 Vergleich der Turbulenzmessungen mit und ohne Verlängerungsbleche

Messpunkte	**Turbulenzgrad in %**		**Abweichung in %**
	Messung 1 mit Verlängerungsblechen	Messung 2 ohne Verlängerungsblechen	Messung 1 zu Messung 2
Links	10,00	9,52	0,48
	10,22	9,15	1,07
Rechts	9,48	9,08	0,41
	8,98	8,68	0,30

5.3.3 Veränderungen am Rotor und Stator

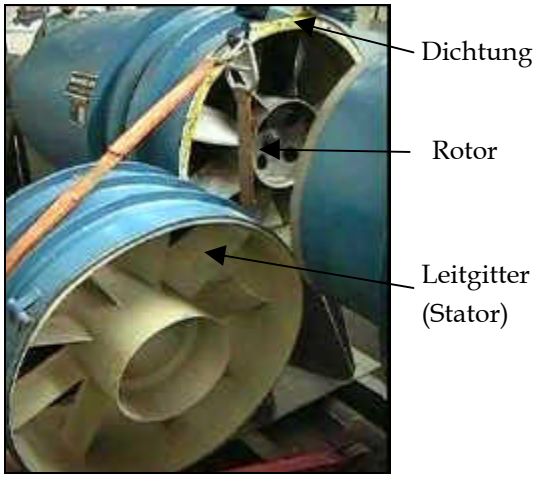


Bild 5.6 Stator nach dem Ausbau

Das Gebläse (Rotor) hat die Aufgabe die nötige Strömungsgeschwindigkeit zu erzeugen. Der Drall, den das Gebläse der Strömung mitteilt, kann durch ein vor oder hinter das Gebläserad geschaltetes festes Leitrad (Stator) weitgehend minimiert werden **[12]**.

Der Stator wurde ausgebaut und gesäubert (**Bild 5.6**).

In axialen Strömungsmaschinen führt der Spalt zwischen den rotierenden Schaufeln und dem feststehenden Gehäuse zu Verlusten und einer erhöhten Schallemission. Durch den Druckunterschied zwischen der Saug- und der Druckseite des Schaufelgitters entsteht eine Sekundärströmung durch diesen radialen Kopfspalt hindurch (**Bild 5.7**).

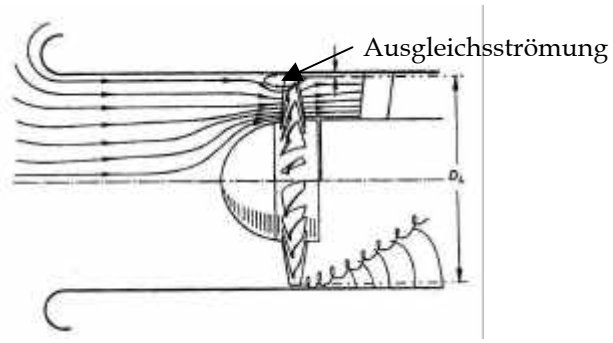


Bild 5.7 Schematische Darstellung der Ausgleichsströmung von der Druck- zur Saugseite im Blattspitzenbereich

Ein zu großer Spalt wirkt sich sowohl aerodynamisch als auch akustisch nachteilig aus. Dies führt zur Verschlechterung des Wirkungsgrades und zu drastischen Pegelerhöhungen des Blattspitzen-Wirbellärms. Verschiedene Materialien unmittelbar vor dem Laufrad und im Spalt verblocken den Spalt und erhöhen den aerodynamischen Strömungswiderstand des Spaltes (**Bild 5.8**) **[4]**.
In dem Windkanal der Fachhochschule Düsseldorf betrug der Spalt zwischen den Schaufeln und dem Gehäuse ca. 3 mm. Um die Strömung zwischen Blattspitzen und dem Gehäuse zu vermindern, wurde ein 2 mm dickes Hackenband (***tesa*** Klettband der Beiersdorf AG) eingeklebt.

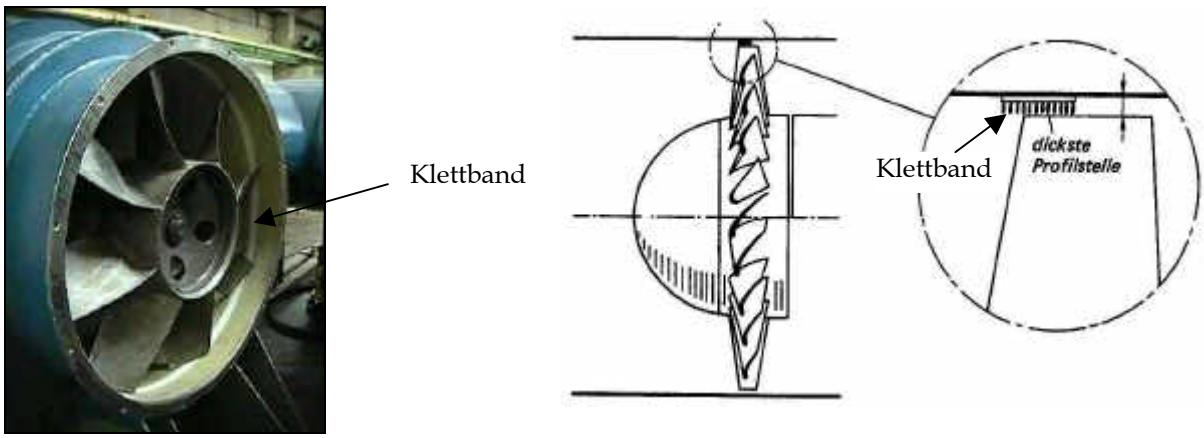


Bild 5.8 Am Rotorgehäuse eingeklebtes Klettband

Zusätzlich wurde die alte Dichtung abgeschliffen und durch eine neue ersetzt. Anschließend wurde der Windkanal wieder zusammengebaut und neu vermessen.

6 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 6.1**).

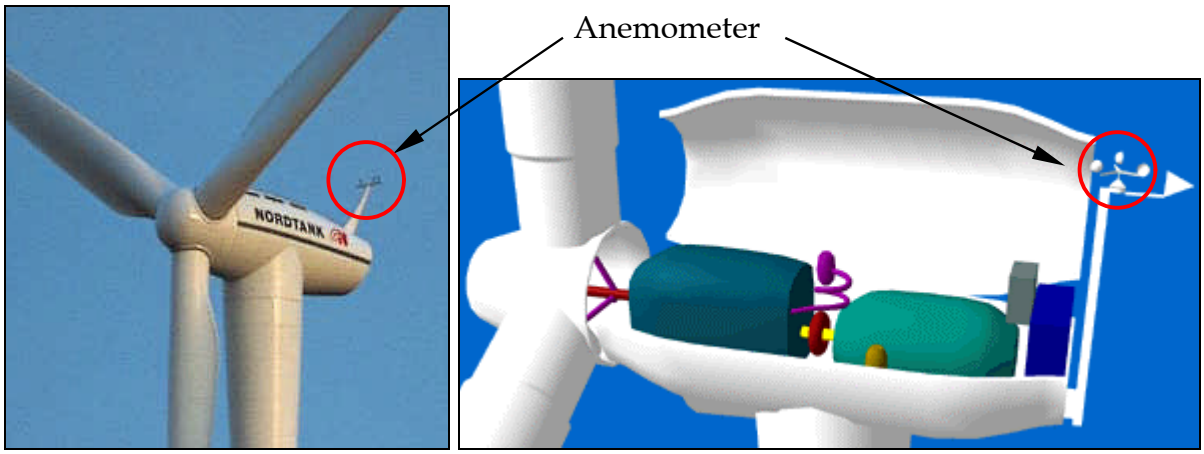


Bild 6.1 Positionierung der Anemometer auf Windenergieanlagen **[32]**

Die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe wird laut dem Verband der dänischen Windkraftindustrie **[32]** 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.

6.1 Die Leistungskurve einer Windenergieanlage

Die Leistungskurve einer Windenergieanlage gibt an, wie hoch die abgegebene elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit ist. In **Bild 6.2** ist die Leistungskurve einer stallgeregelten Anlage mit 600 kW Leistung dargestellt.

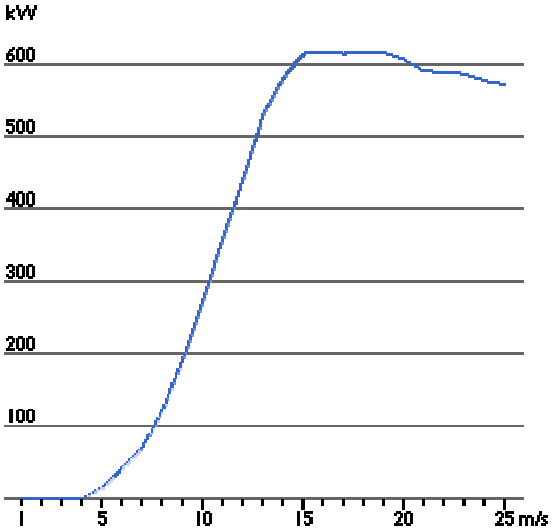


Bild 6.2 Leistungskurve einer stallgeregelten WEA **[32]**

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 6.2** 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 ± 10 Prozent aufweisen können **[32].**

6.2 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[24] 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[25] 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 6.3** dargestellt. Die weiteren angefertigten Protokolle befinden sich im Anhang.

[24] Vergleichswert

[25] Korrelation: statistisch ermittelte Abhängigkeit zweier variabler Größen voneinander; Wechselbeziehung

report of

Normalanströmung

FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

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

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:	

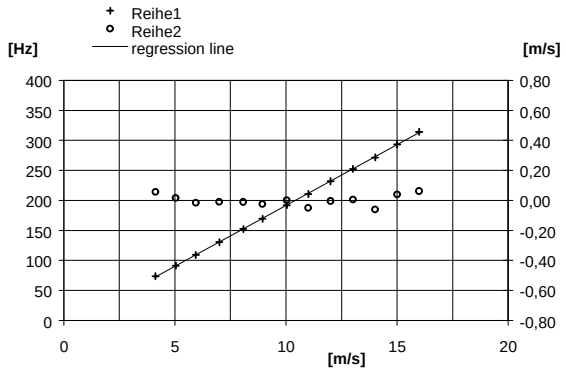
the complete procedure is documentet in in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,13	73,65
5,94	108,86
8,08	152,26
10,04	192,23
12,01	232,00
14,02	271,59
15,99	314,05
15,00	293,50
13,01	252,50
11,01	210,77
8,94	169,45
6,99	130,32
5,04	91,18

regression line (4 to 16 m/s):
V[m/s]= 0,049 [m/s]+ 0,5522 [m/s]/[Hz]*frequency



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

0,0369 [m/s]	standard deviation	[m/s]
0,999909	correlation coefficient ²	

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)

Bild 6.3 Beispiel eines Kalibrierprotokolls

Die Messposition des Anemometers wurde bei den Kalibrierungen nicht verändert. Bei der Messung der Schräganströmung wurde darauf geachtet, dass die Schalenkreuzmitte (Punkt M) auf gleicher Höhe gehalten wird (siehe **Bild 6.6** und **6.7**).

6.3 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 6.4**).

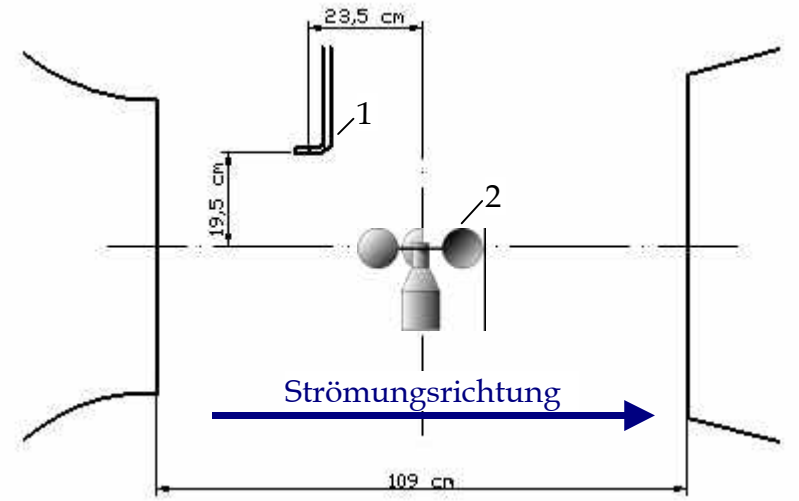


Bild 6.4 Positionierung der Anemometer und des Prandtlschen Staurohres bei der Kalibrierung
Position 1: Referenzmessung mit dem Prandtlschen Staurohr;
Position 2: das zu kalibrierende Anemometer

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 Anemonemeterposition **2** gleichzeitig aufgenommen. Auf der Referenzposition wurde das für die Kalibrierung verwendete Referenz-Prandtlrohr und auf der Anemonemeterposition ein anderes Staurohr ähnlicher Bauart montiert (**Bild 6.4**).

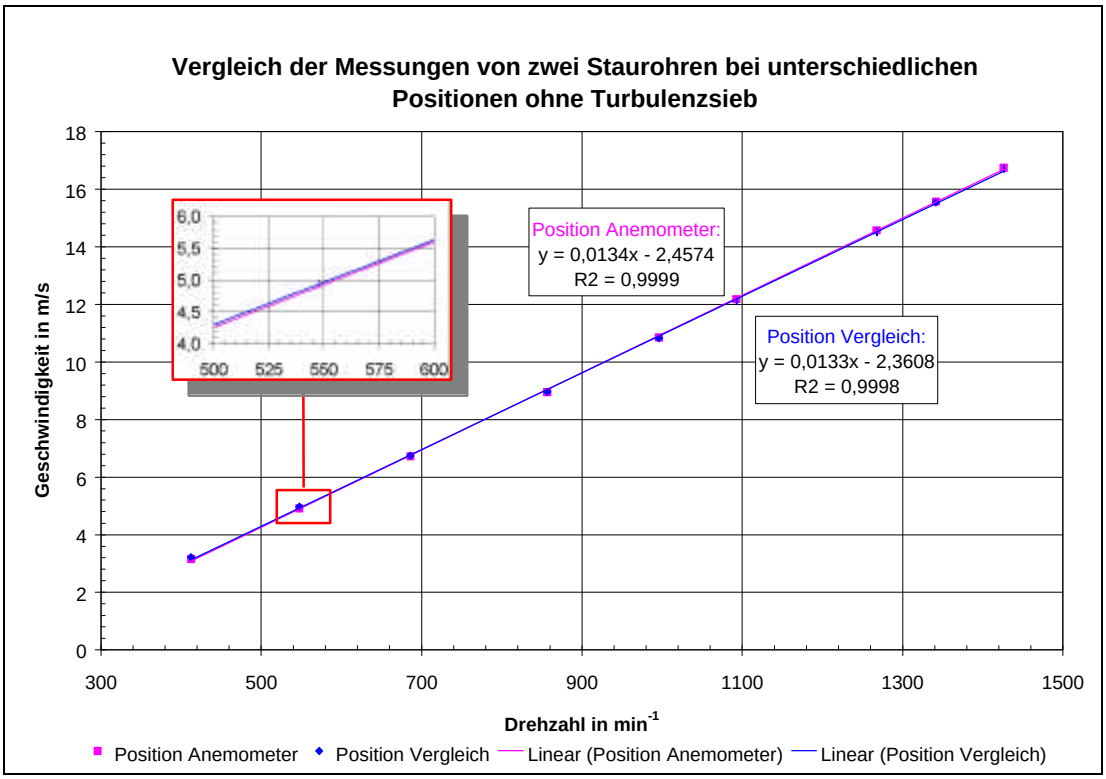


Bild 6.5 Vergleich der Messungen von zwei Staurohren bei unterschiedlichen Positionen

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 6.5** zeigt, dass die aufgenommenen Geschwindigkeiten sehr gut übereinstimmen. Der Fehler ist kleiner 0,01 %. Diese beiden Messungen wurden ohne das Turbulenzsieb durchgeführt, da man, wie im **Kapitel 2.3** beschrieben, 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.

6.4 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.

6.4.1 Normalanströmung

Bei der Simulation der Normalanströmung wurde das Anemometer mittig in den Windkanal positioniert (**Bild 6.6**). Die senkrechte Ausrichtung erfolgte in zwei Richtungen mit einem Lot. Die hier dargestellte Anströmung diente für die weiteren Versuche als Referenz.

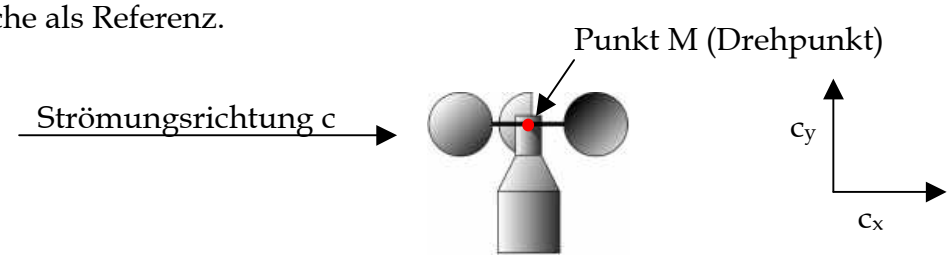


Bild 6.6 Darstellung der Normalanströmung

6.4.2 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 6.4** genauer untersucht worden. In **Bild 6.7** ist der durchgeführte Versuchsaufbau skizziert.

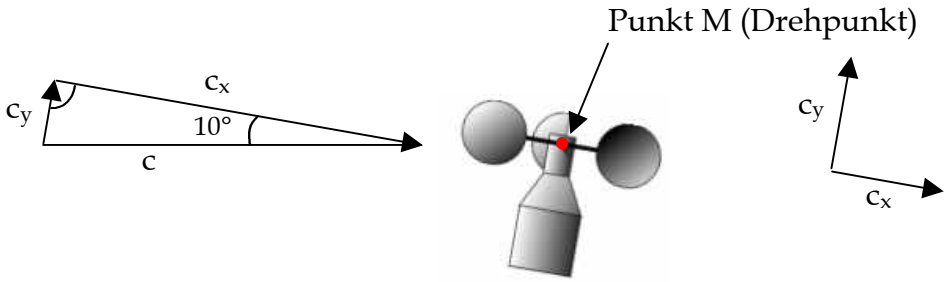


Bild 6.7 Darstellung der Schräganströmung

Man geht davon aus, dass Anemometer eine Strömung senkrecht zu ihrer Drehachse messen. Nach dem **Bild 6.7** 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 6.1**). Die Abweichung ist mit Hilfe der einfachen Winkelfunktion

$$c_x = c \cdot \cos 10° \qquad \textbf{(6.1)}$$

berechnet worden.

Tabelle 6.1 Abweichungswerte zur Normalanströmung

Strömungsgeschwindigkeiten		
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%.

6.4.3 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 6.8** und **Bild 6.9**).

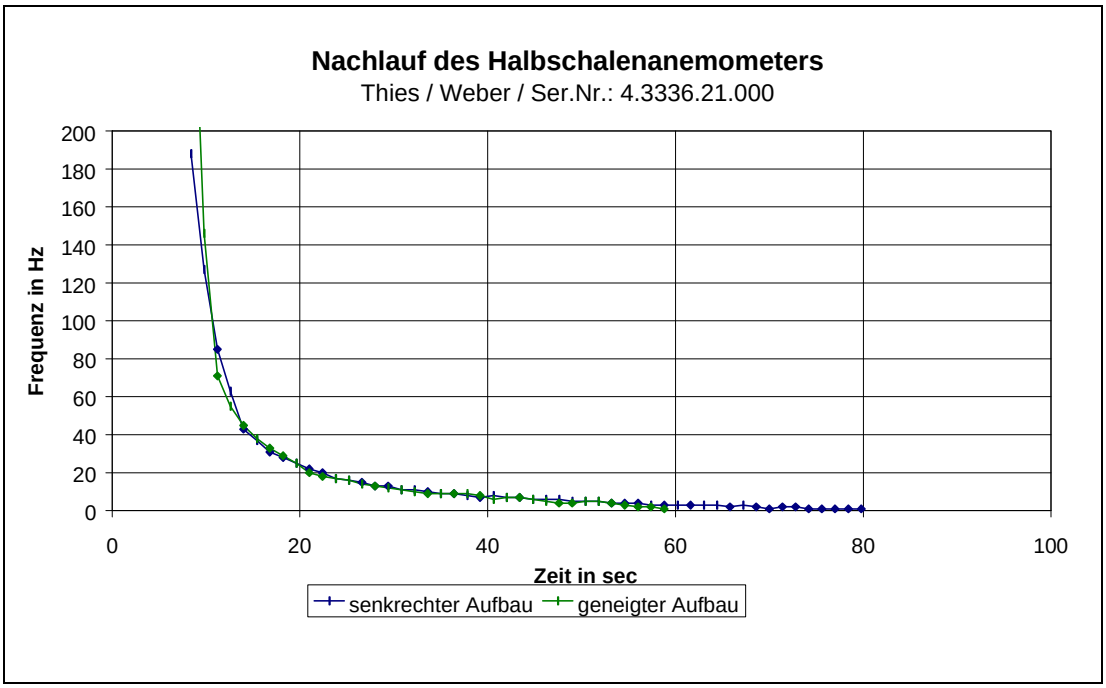


Bild 6.8 Einwirkung der 10 Grad Neigung auf das Nachlaufverhalten des Thies Anemometers

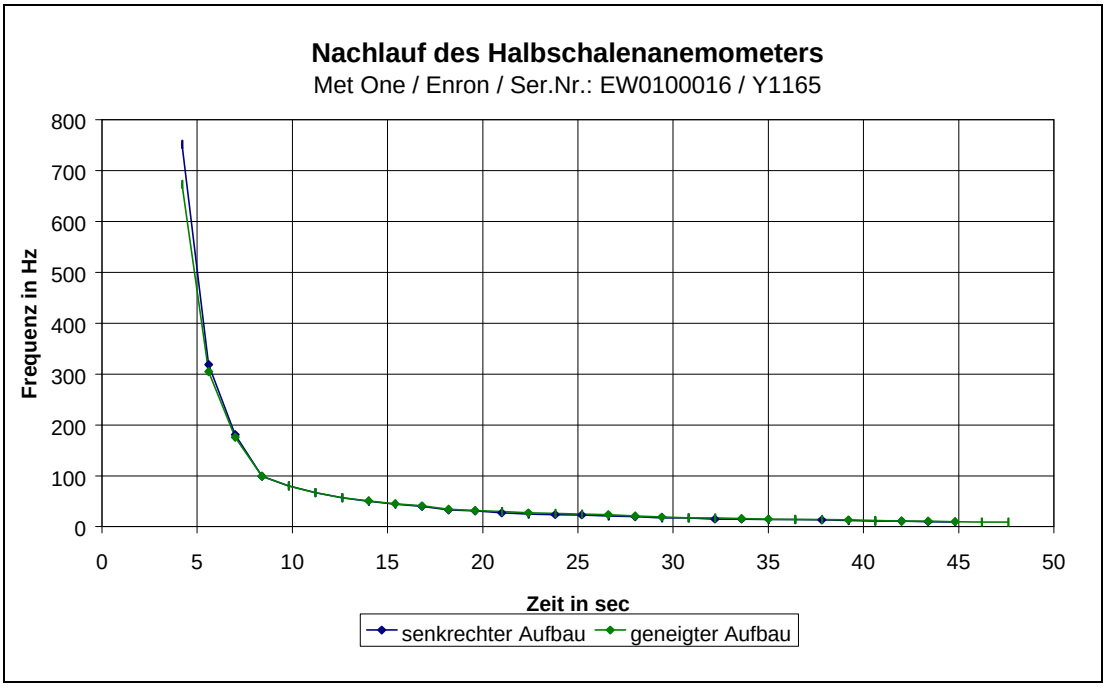


Bild 6.9 Einwirkung der 10 Grad Neigung auf das Nachlaufverhalten des Met One Anemometers

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.

6.4.4 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 6.10** sind die Ergebnisse aufgeführt. Es wurde nach dem gleichen Verfahren wie im **Kapitel 6.4.3** beschrieben vorgegangen.

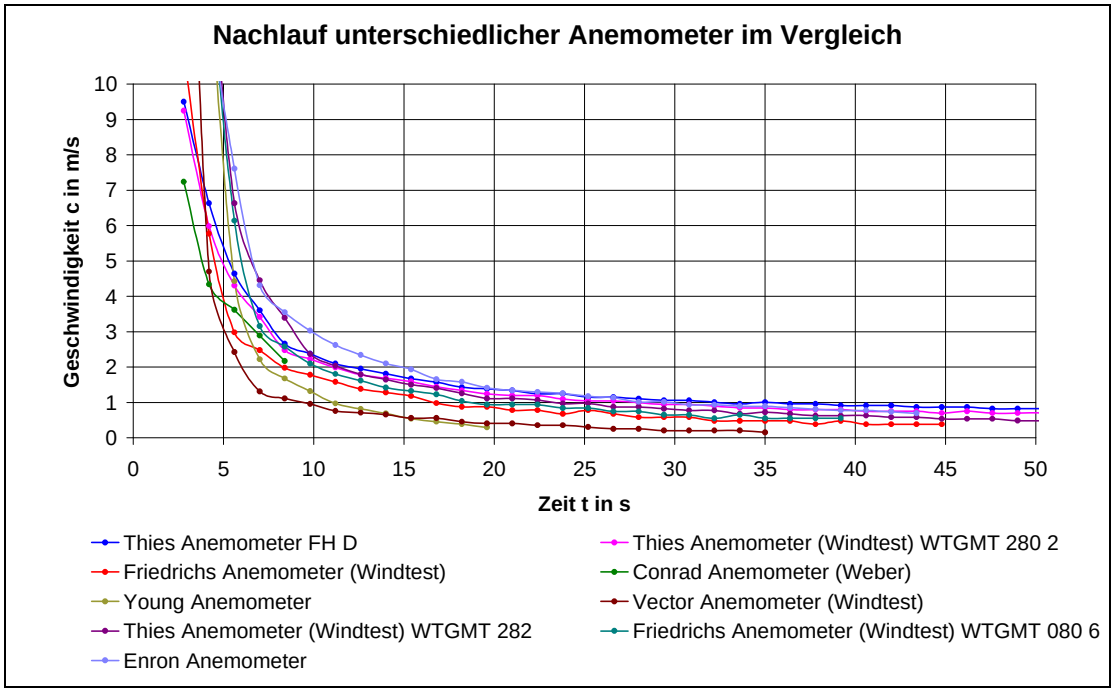


Bild 6.10 Nachlaufverhalten der Anemometer im Vergleich

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 6.10** weisen alle Anemometer ein ähnliches Verhalten auf.

6.5 Variation der Turbulenz

Um den Einfluss der Turbulenz auf die Anemometer zu untersuchen, wurden verschiedene Methoden zur Turbulenzerzeugung im Windkanal getestet. In **Bild 6.11** 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 6.12** dargestellt ist, entschieden. In diesem Fall wurde über den gesamten Strömungsquerschnitt eine kontinuierliche Turbulenzerhöhung gemessen.

Bild 6.11 Turbulenzstern zur Anhebung des Turbulenzgrades

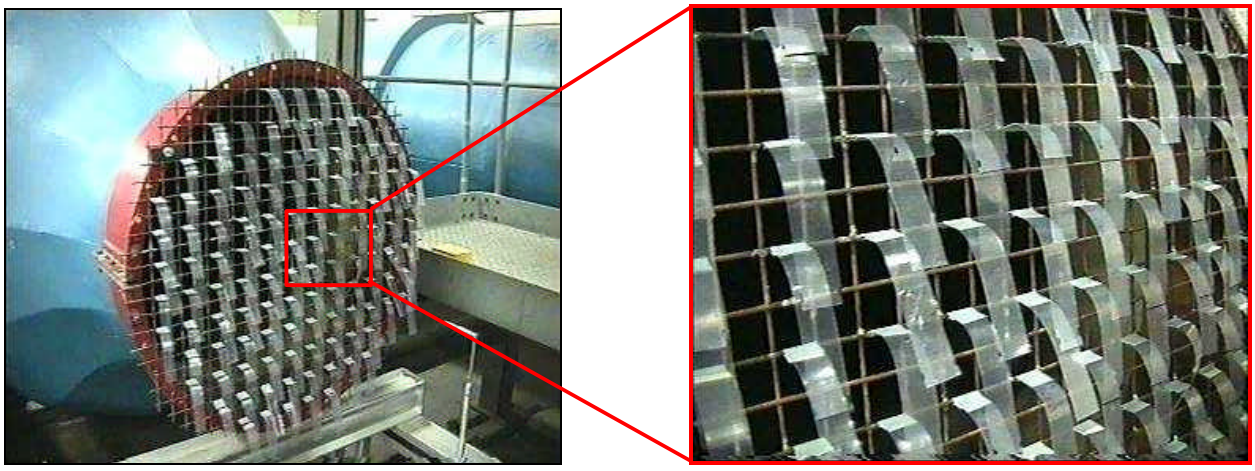


Bild 6.12 Gewähltes Turbulenzsieb zur Erzeugung künstlicher Turbulenzen

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.

6.6 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 **6.14** bis **6.29** 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 Prandtlschen 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 6.1** 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 6.1** berechneten idealen Werte (rot gestrichelte Linie).

6.6.1 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.

Bild 6.13 THIES Typ 4.3303.22.000

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 %

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.

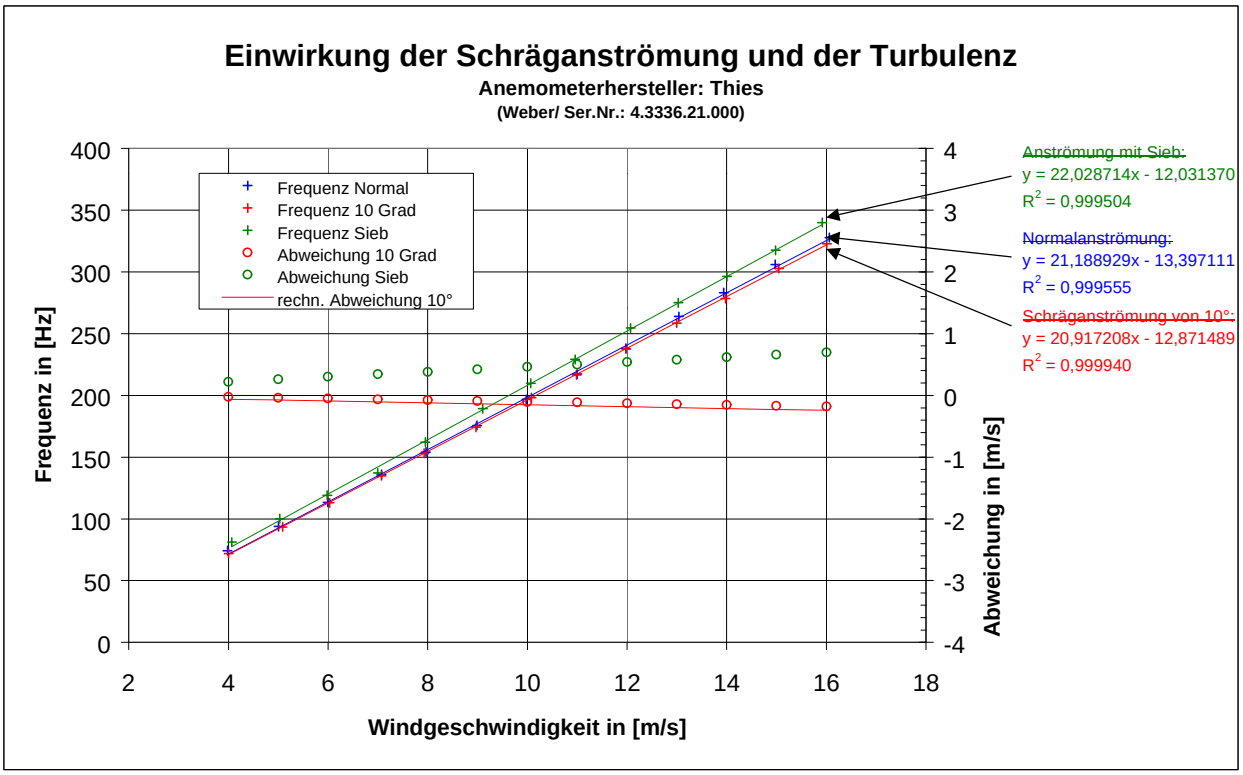


Bild 6.14 Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; THIES der FH-Düsseldorf

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.

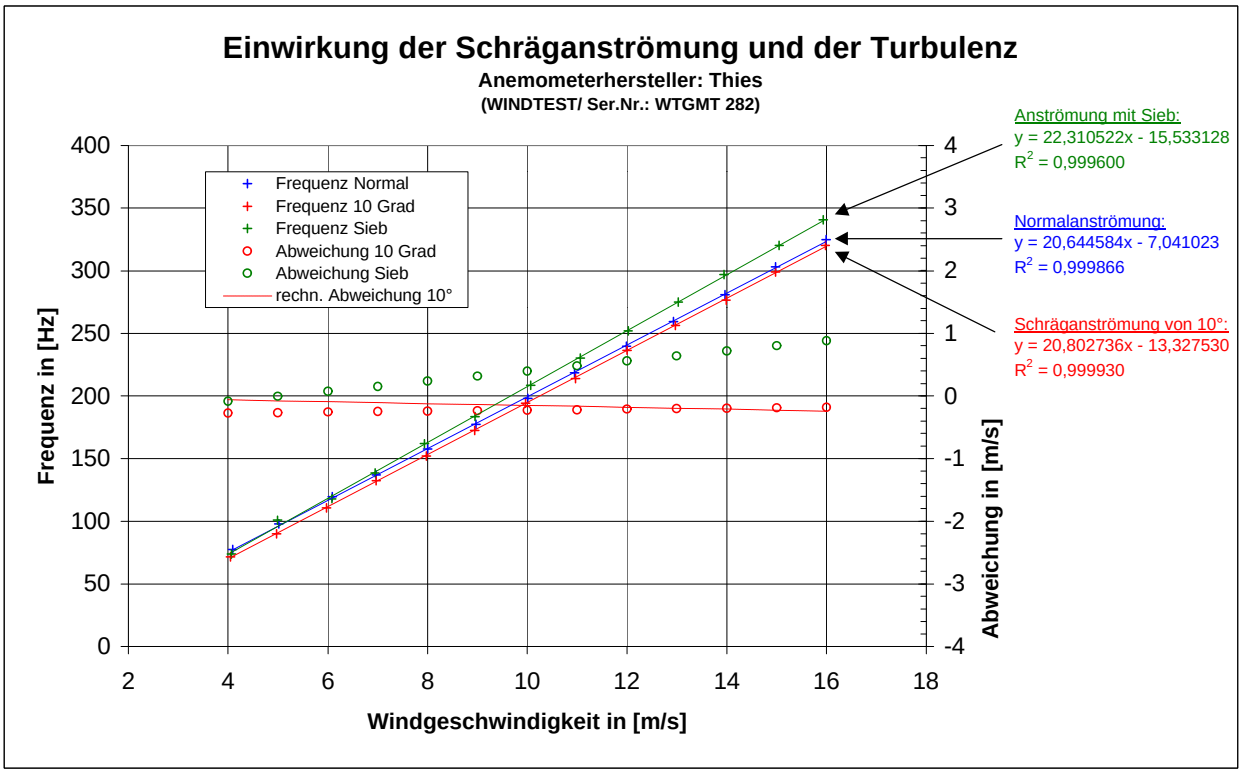


Bild 6.15 Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; THIES WTGMT282

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

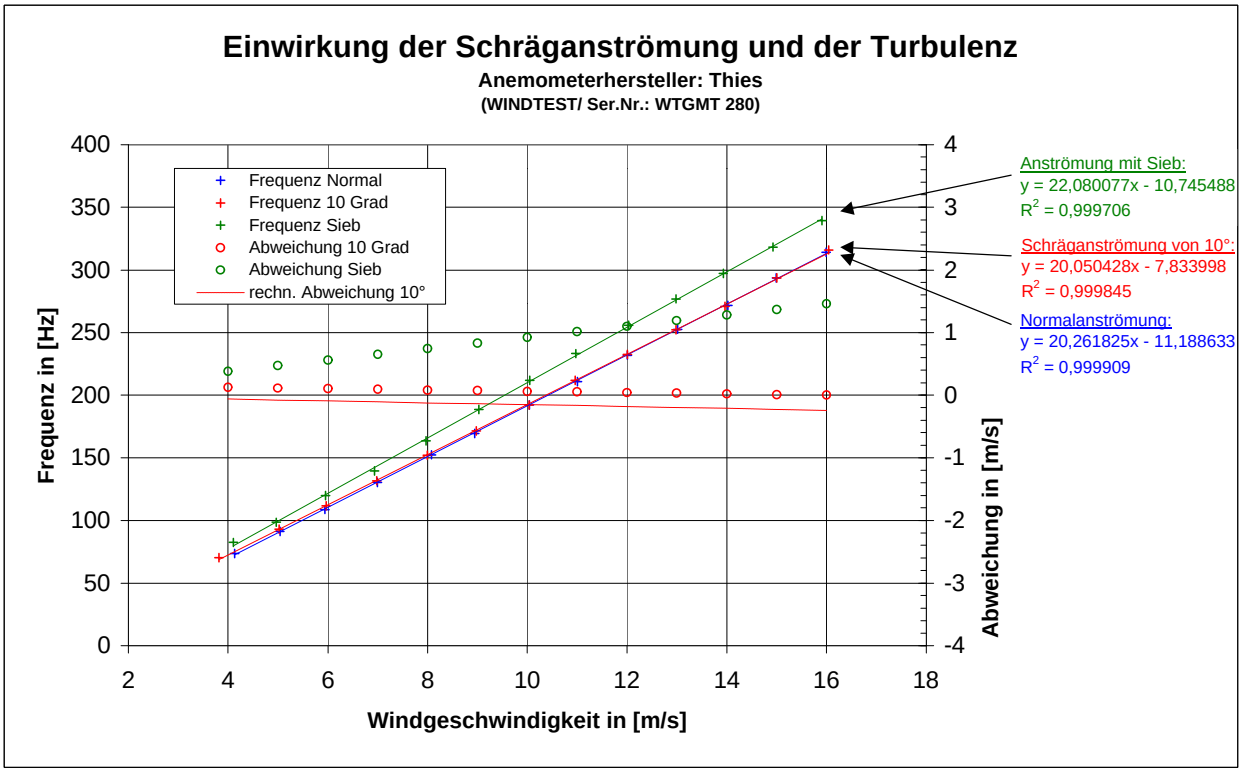


Bild 6.16 Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; THIES WTGMT280

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.

6.6.2 Anemometer der Firma Theodor Friedrichs & Co.

Bild 6.17 Friedrichs Typ 4033.1100 [**27**]

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 %

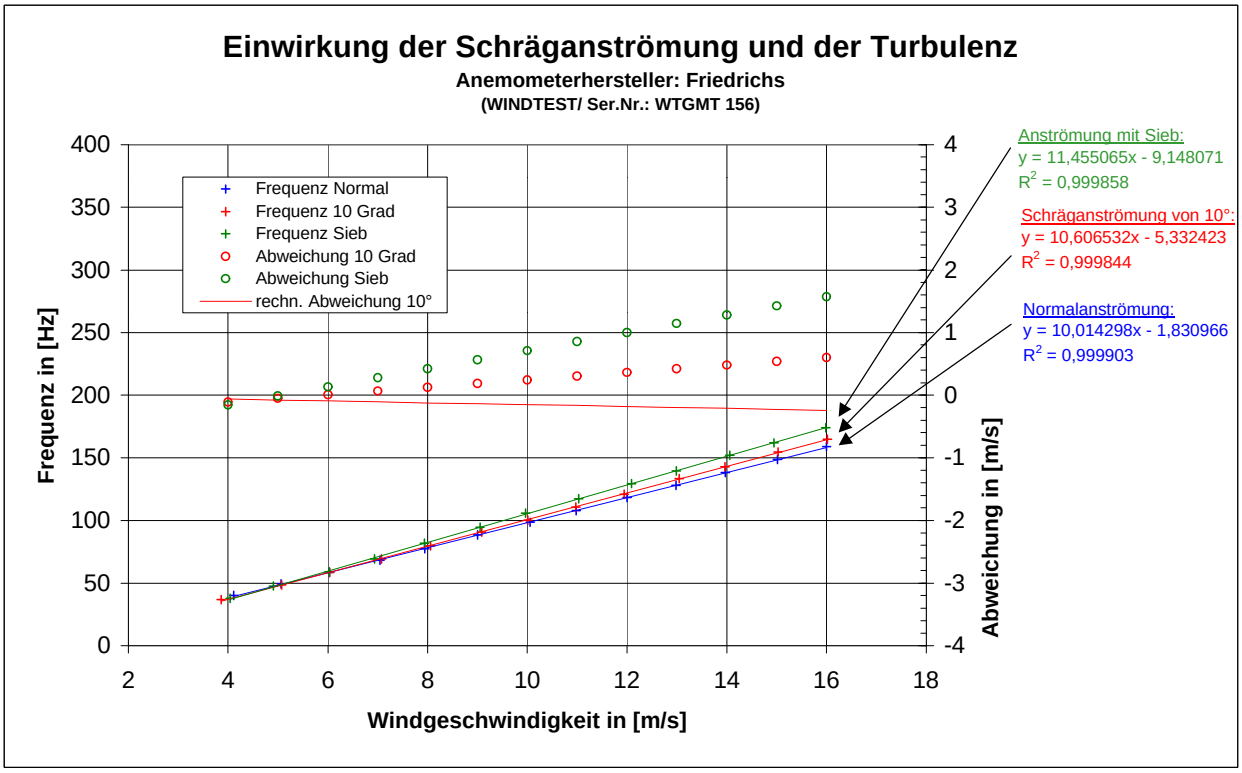


Bild 6.18 Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; Friedrichs WTGMT156

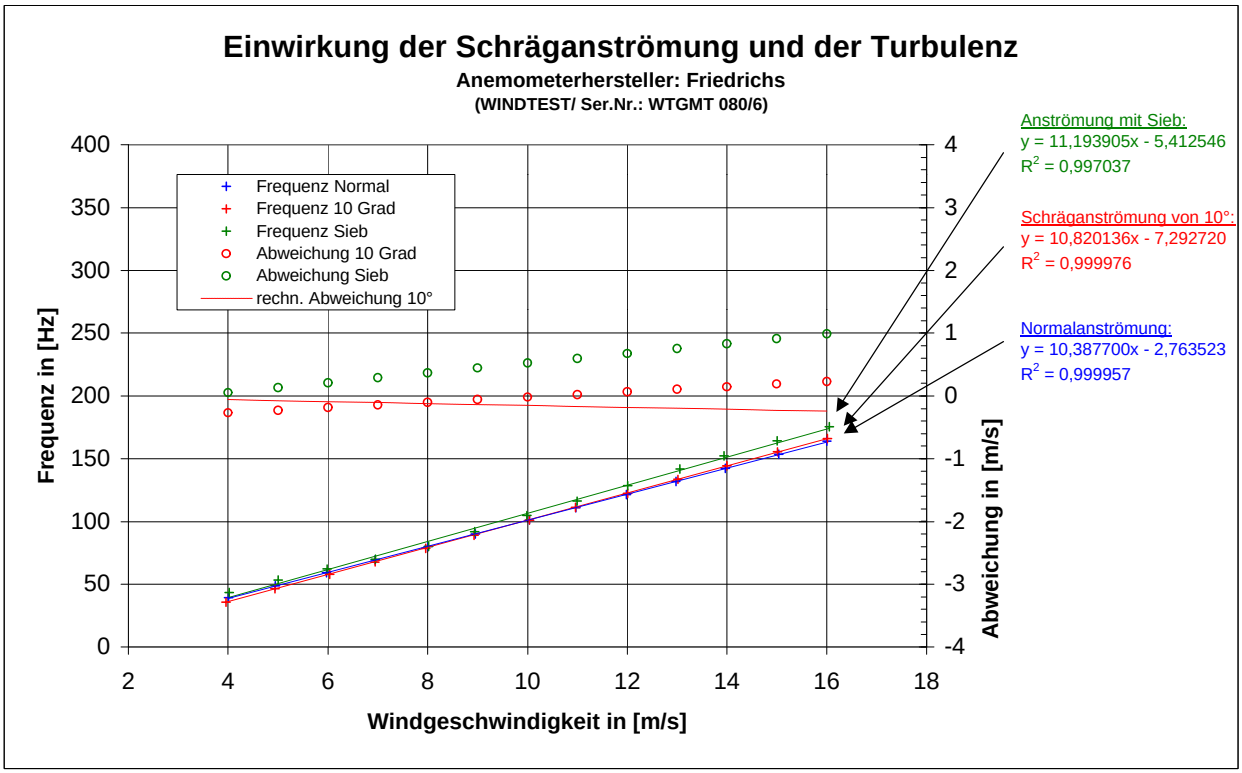


Bild 6.19 Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; Friedrichs WTGMT080/6

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.

6.6.3 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.

Bild 6.20 YOUNG Typ 12102 [**28**]

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 %

Abweichung 2: 3,59 %

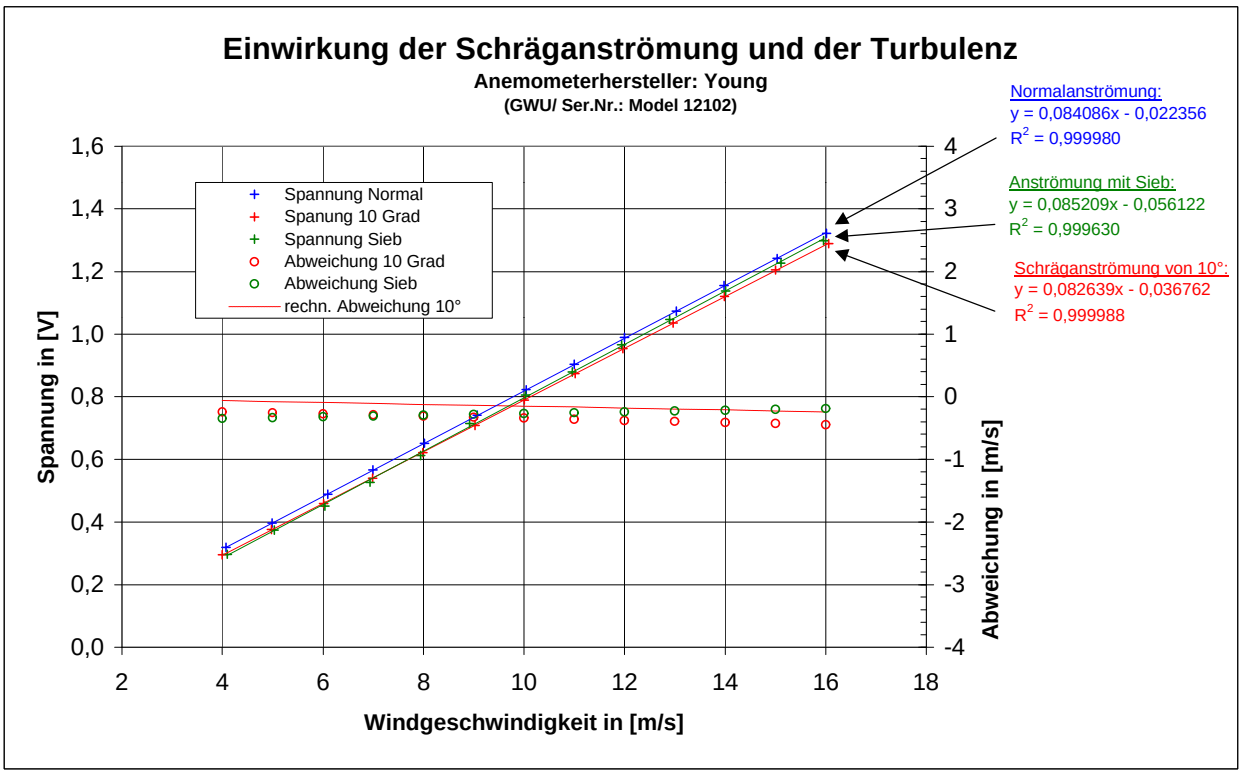


Bild 6.21 Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; YOUNG 12102

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.

6.6.4 Anemometer der Firma Met One Instruments

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

Bild 6.22 Met One Typ Y1165 [**31**]

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 %

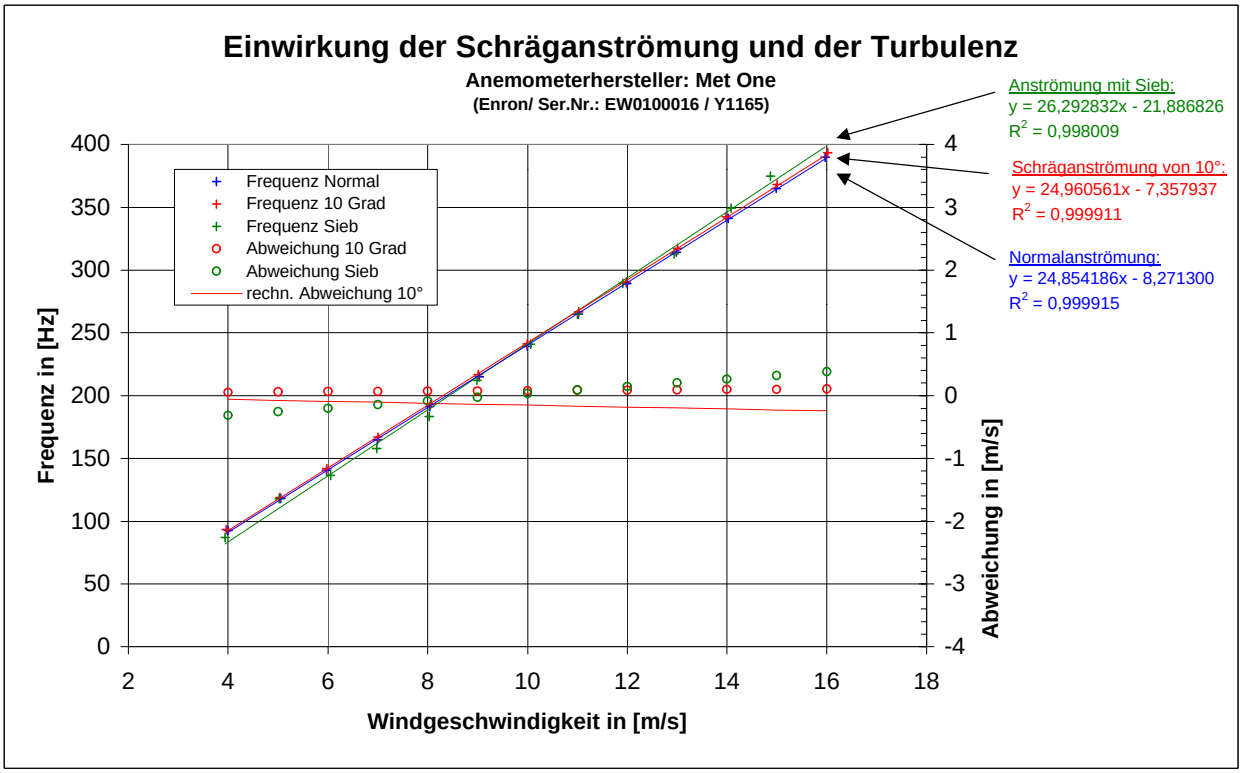


Bild 6.23 Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; MET ONE Y1165

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

6.6.5 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.

Bild 6.24 Vector A100L2 [**30**]

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 %

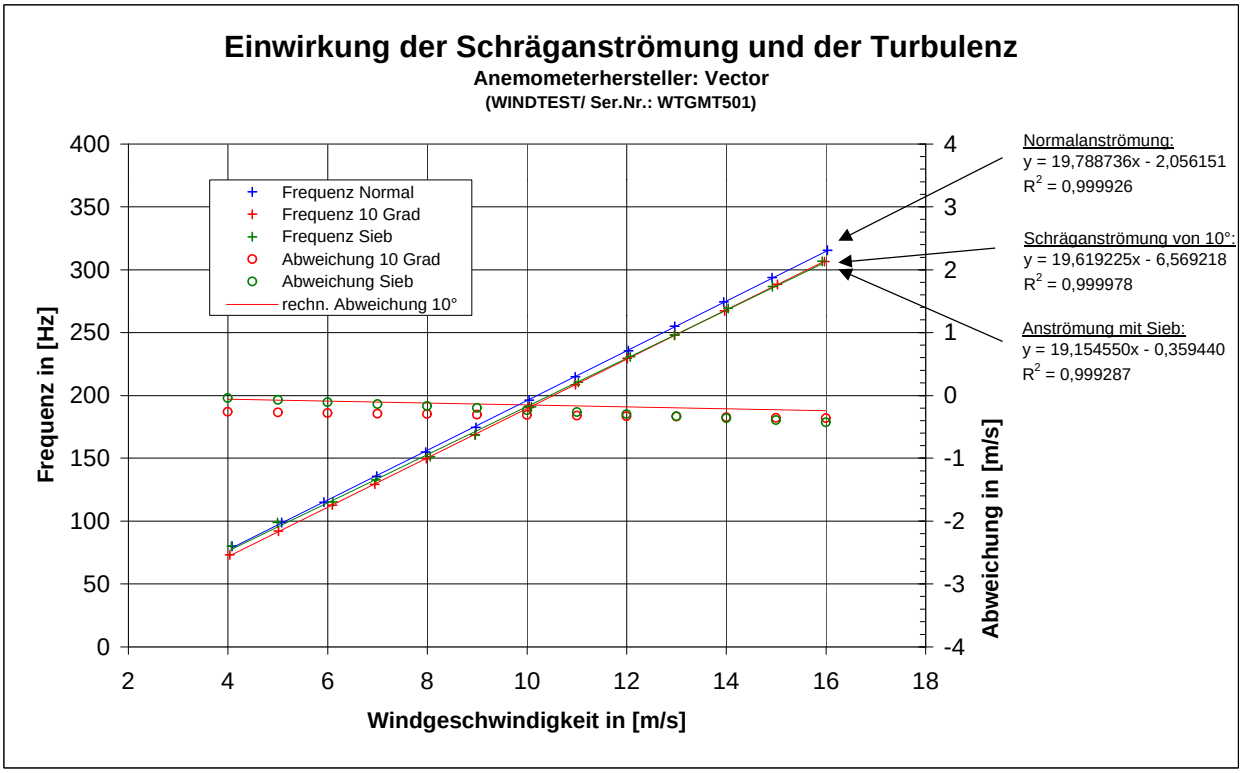


Bild 6.25 Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; Vector WTGMT501

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

6.6.6 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.

Bild 6.26 Conrad Electronics Typ Feger + Co. Typ Wetterstation OZ-1 [**29**]

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 %

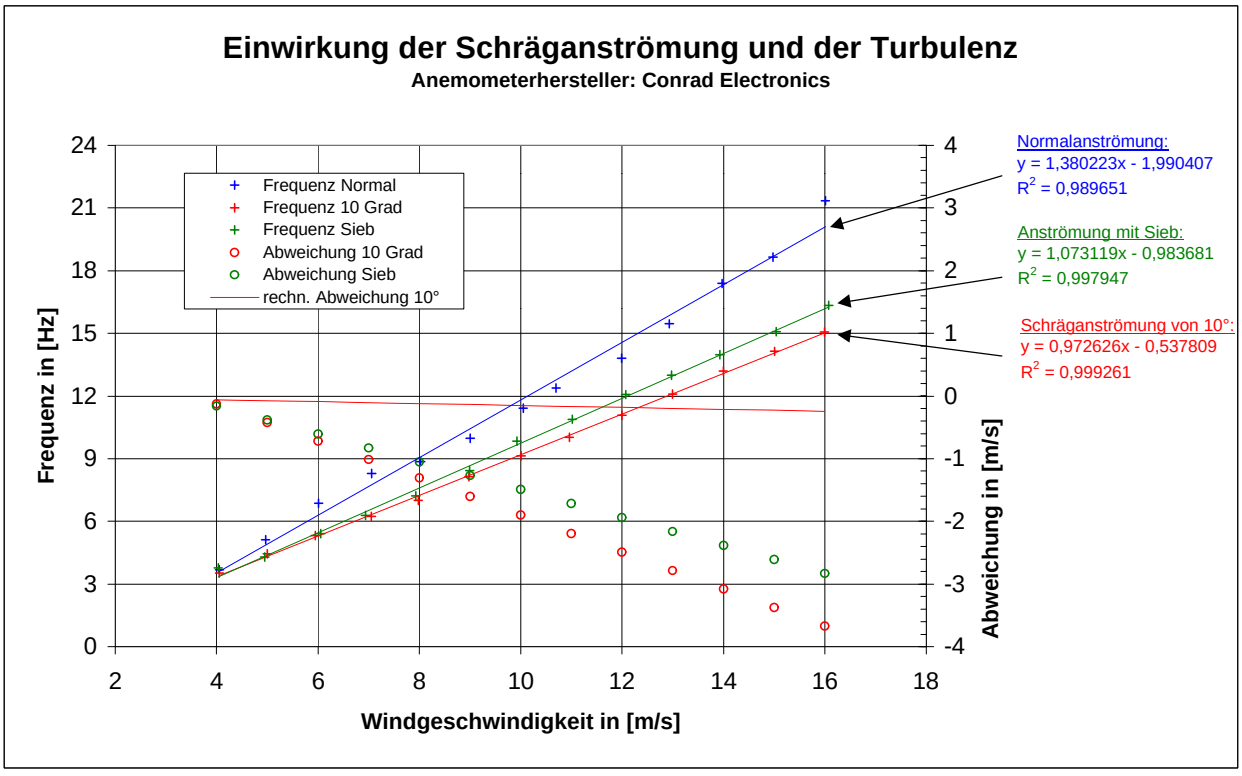


Bild 6.27 Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; Conrad Electronics

6.6.7 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[26] von 0,1-40 Hz einzustellen und festzulegen, ob gemittelte Werte oder Rohdaten ausgegeben werden sollen.

Bild 6.28 METEK Typ USA-1 [**25**]

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 %

[26] Abtastrate; Abstand der Stützpunkte auf der Zeitachse (Angabe in Hertz)

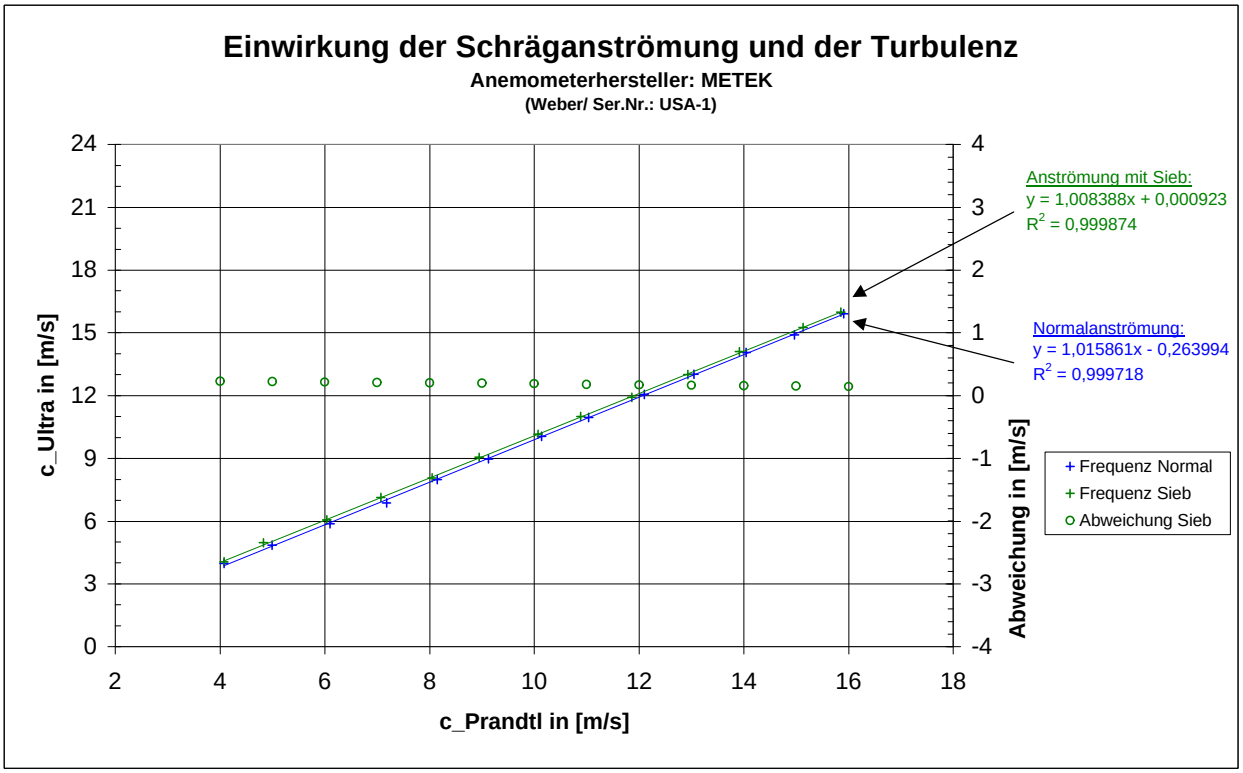


Bild 6.29 Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; METEK USA-1

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.

6.7 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 6.30** und **6.31** dargestellt. Die Abweichungen zu der Normalanströmung ist auf der y-Achse aufgetragen.

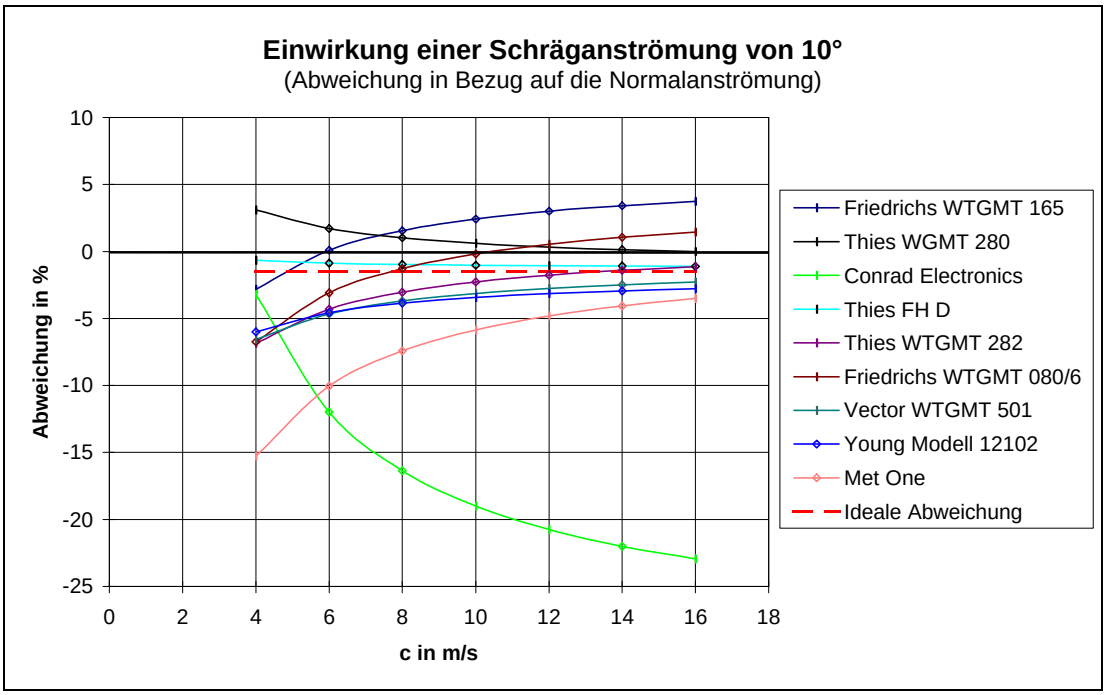


Bild 6.30 Direkter Vergleich der Anemometer bei einer Schräganströmung

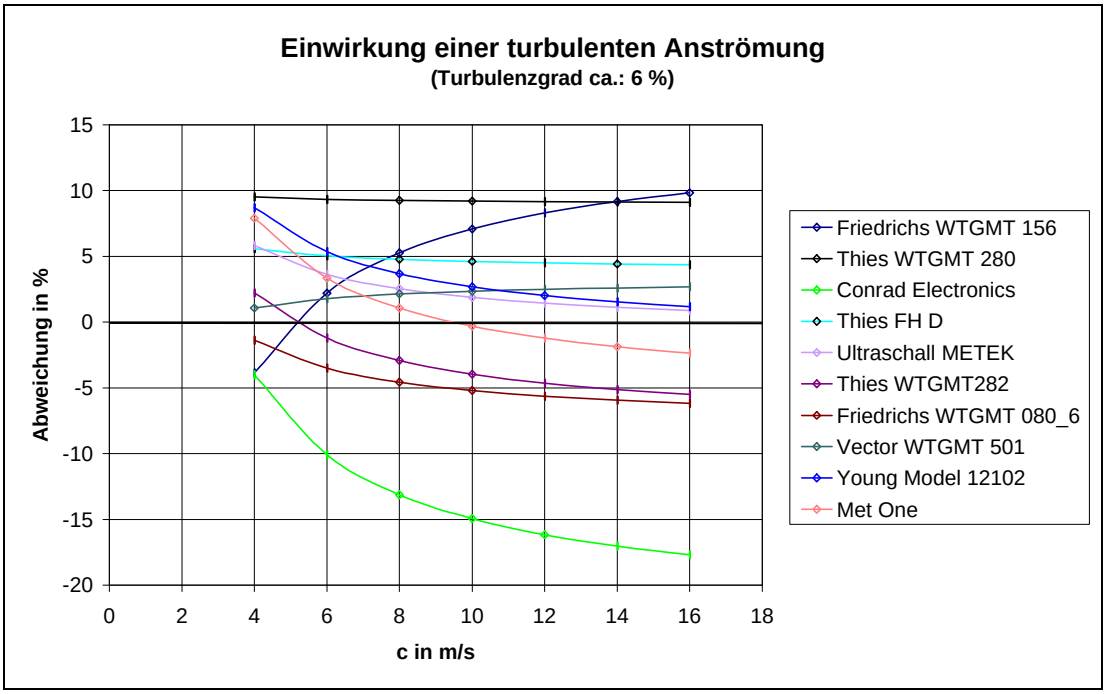


Bild 6.31 Direkter Vergleich der Anemometer bei einer turbulenten Anströmung

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.

6.8 Abweichung der Kalibrierkurve bei turbulenter Anströmung

6.8.1 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[27] kontinuierlich ab (**Bild 6.32**).

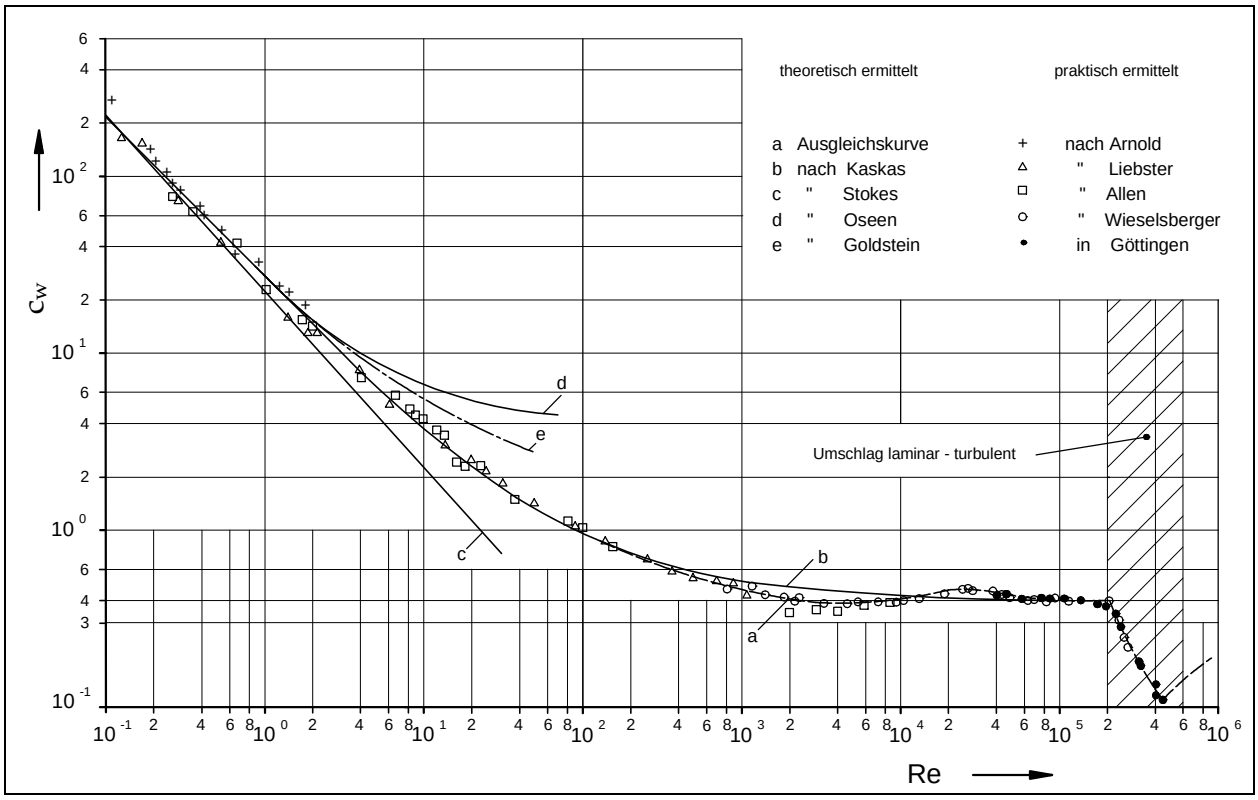


Bild 6.32 Widerstandsbeiwert c_w in Abhängigkeit der Reynoldszahl bei einer umströmten Kugel [**15**]

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“[28] Grenzschicht (**Bild 6.33**) und der

[27] dimensionslose Kennzahl. Verhältnis der Trägheitskraft zur Reibungskraft. $Re = (c_x D)/\nu$

[28] 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**].

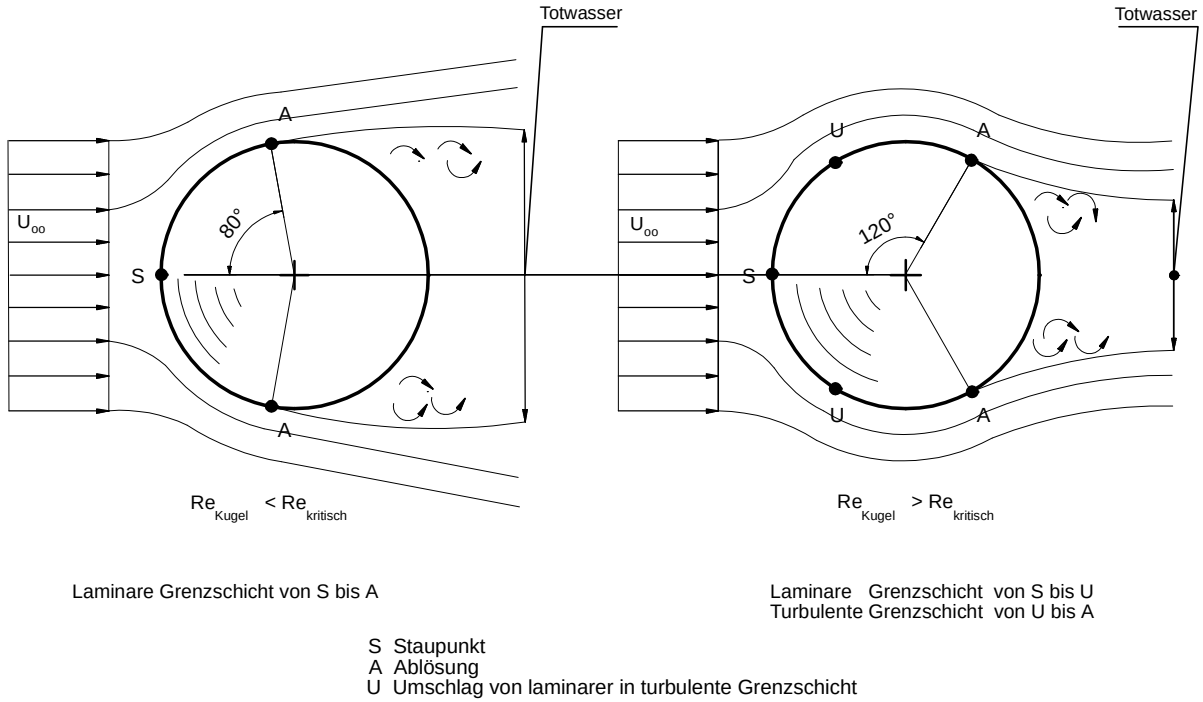


Bild 6.33 Kugelumströmung bei „laminarer“ und „turbulenter“ Grenzschicht [**15**]

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 6.34** 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.

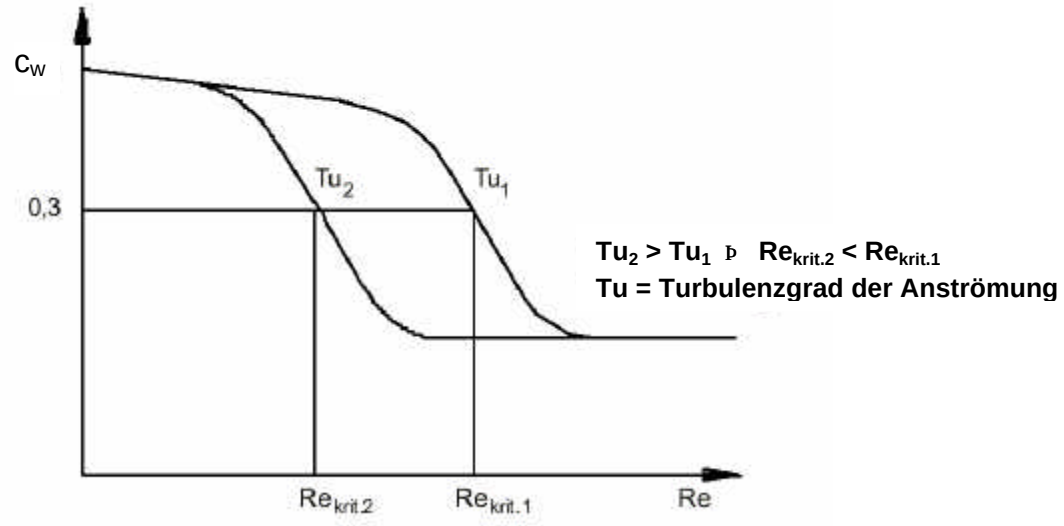


Bild 6.34 Einwirkung des Turbulenzgrades der Anströmung auf den c_w-Wert einer Kugel [**15**]

6.8.2 Reynoldszahlen einer umströmten Kugel

Die unterschiedlichen Anemometer besitzen einen Halbschalendurchmesser von ca. 30 bis 75 mm. Hiermit errechnet sich mit Gleichung **(6.2)** eine Reynoldszahl von:

$$Re = \frac{c \cdot d_{Kugel} \cdot \rho_{Luft}}{\eta_{Luft}} \quad [\mathbf{15}] \qquad \mathbf{(6.2)}$$

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

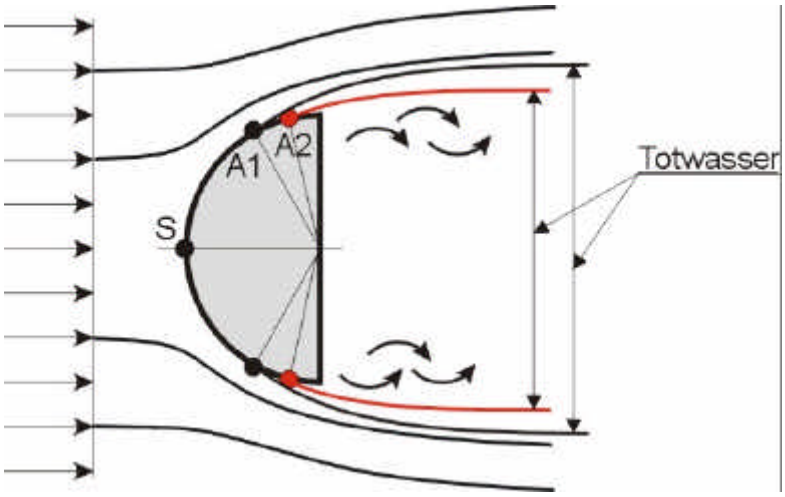
Re_{max}:	c=16 m/s	d_{Kugel_Max}= 0,075 m	⇒	**Re_{max} » 80000**
Re_{min}:	c=4 m/s	d_{Kugel_Min}= 0,03 m	⇒	**Re_{min} » 8000**

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.

6.8.3 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 6.35** 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.



$Tu_1 < Tu_2$
$\Rightarrow TWG_1 > TWG_2$
$\Rightarrow c_w\text{-Wert}_1 > c_w\text{-Wert}_2$

Tu:	Turbulenzgrad
TWG:	Totwassergebiet
S:	Staupunkt
A:	Ablösepunkt

Bild 6.35 Änderung des Totwassergebietes bei erhöhter Turbulenz (schematisch)

6.9 Vergleich der Kalibrierprotokolle

Die Kalibrierprotokolle der von der Firma WINDTEST Grevenbroich GmbH zur Verfügung gestellten Anemometer wurden mit den Kalibrierprotokollen der Firma WINDTEST Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH verglichen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der **Tabelle 6.2** aufgeführt. Die genauen Berechnungen befinden sich im Anhang.

Tabelle 6.2 Abweichung in Prozent zwischen den eigenen Kalibrierprotokollen und den Kalibrierprotokollen der Firma WINDTEST Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH

Firma	Thies	Thies	Friedrichs	Friedrichs	Vector
WTGMT[29]-Nr.	280	282	156	080/6	501
arithmetischer Mittelwert der Frequenzabweichung	-5,50	-0,97	-2,33	-0,23	1,36
quadratischer Mittelwert der Frequenzabweichung	5,50	1,66	2,38	0,29	1,36

Die Abweichungen der Frequenz betragen 2,38 bis 5,50 %. Für die Tatsache, dass die Anemometer gleichen Herstellers (Thies und Friedrichs) und gleicher Bauart unterschiedliche Abweichungen aufweisen, ist keine Erklärung gefunden worden.

[29] gerätespezifische Nummer der Firma WINDTEST

Zusammenfassung

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

Vermessung der Geschwindigkeitsverteilung des Windkanals

Die Geschwindigkeit im Windkanal wurde mit unterschiedlichen Messmethoden wie z.B. mit dem Prandtlschen Staurohr, Fiberfilm- und Ultraschallanemometer gemessen. Die Geschwindigkeitsabweichungen zwischen den verschiedenen Messmethoden betrugen ca. 2 %. Das heißt, dass alle verwendeten Methoden sich gut für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal eignen. Ein Messfehler von 2 % bedeutet aber einen Fehler für den Energiegehalt des Windes von 4%.
Die Vermessung des Geschwindigkeitsprofils hat gezeigt, dass die Geschwindigkeitsverteilung im Windkanal auf etwa 3/4 des Austrittsdurchmessers von 600 mm gleichmäßig ist. Die Schwankung der mittleren Geschwindigkeit betrug hier 1 %.

Vermessung des Turbulenzgrades vom Windkanal

Im Gegensatz zu der Geschwindigkeitsmessung erwies sich die Reproduzierbarkeit der Turbulenzmessung als schwierig. Bei den verschiedenen Möglichkeiten, den Turbulenzgrad zu bestimmen (mit DMM oder HP-Analysator aus dem Fiberfilmsignal oder mittels Ultraschallanemometer), sind größere Abweichungen aufgetreten. Hierbei wurden Turbulenzgrade von 0,2 bis 4 % ohne Turbulenzerzeuger und 2 bis 8 % mit Turbulenzerzeuger bei gleichen Anströmbedingungen gemessen. Der Grund dafür lag darin, dass die verwendeten Digitalmultimeter bei niedrigen Wechselspannungen unter 50 mVAC fehlerbehaftet messen. Die untersuchten Ultraschallanemometer berechnen den Turbulenzgrad anders als die vorher beschriebenen Anemometer. Sie ermitteln ihn aus den Standardabweichungen und der Windgeschwindigkeit.
Bei der Berechnung des Turbulenzgrades ist auf jeden Fall auf den dazugehörigen Frequenzbereich der Schwankungsgröße zu achten, da sie einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf den Turbulenzgrad hat. Je nach Samplingrate der verschiedenen Messgeräte werden die Windgeschwindigkeiten unterschiedlich genau erfasst. Da alle Messverfahren nach einem anderen Prinzip funktionieren und unterschiedliche Frequenzauflösungen besitzen, ergeben sich relativ große Abweichungen. An dieser Stelle können weitere Untersuchungen angeknüpft werden.

Kalibrierung der Anemometer

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 kegeligen 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 kegeligen Halbschalenanemometer liefern bei turbulenter Anströmung demnach genauere Messwerte als die halbkugeligen. 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 kegeligen 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**] Kameier, Frank — ***Experimentelle Untersuchung zur Entstehung und Minderung des Blattspitzen-Wirbellärms axialer Strömungsmaschinen***
Dissertation TU Berlin (1993)

[**5**] Moutamassik, Youssef — ***Verbesserung eines Ultraschallverfahrens zur Volumenstrommessung für Industrieventilatoren***
Diplomarbeit FH Düsseldorf (2000)

[**6**] Deutsches Windenergie-Institut GmbH — ***Aufstellungszahlen der Windenergienutzung in Deutschland***
www.dewi.de

[**7**] VDI Richtlinie 3786 — ***Turbulenzmessung mit Ultraschall-Anemometern***
Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf (1994)

[**8**] VDI-Richtlinie 3786 — ***Bestimmung des vertikalen Windprofils mit Doppler-SODAR-Messgeräten***
Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf (1994)

[**9**] DISA Elektronik A/S — ***Beschreibung des 55 M-Systems***
DISA Elektronik A/S, Herlev (1971)

[**10**] ISEL AUTOMATION — ***ISEL – CNC – Betriebssystem 5.x Programmieranleitung***
ISEL Automation KG, Eiterfeld (2000)

[**11**] Dinglerwerke AG — ***Betriebsanleitung Windkanal Göttinger Bauart***
Dinglerwerke AG, Zweibrücken (1968)

[**12**] Denk, V.; Grießer, H. — ***Anleitung zum aerodynamischen Praktikum***
Grünzweig & Hartmann AG, Ludwigshafen (1968)

[**13**] Kameier, Frank — ***Vorlesungsskript Strömungsmaschinen***
Fachhochschule Düsseldorf (1999)

[**14**] Kameier, Frank
Neumann, Armin — ***Anleitung zum Praktikum Strömungsmechanik: Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal mittels Prandtlschem Staurohr***
Fachhochschule Düsseldorf (1999)

[**15**] Kameier, Frank
Neumann, Armin — ***Anleitung zum Praktikum Strömungsmaschinen: Ermittlung des Widerstandsbeiwertes c_w und der kritischen Reynoldszahl Re_{Krit} einer umströmten Kugel***
Fachhochschule Düsseldorf (1999)

[**16**] DANTEC Dynamics A/S — ***Info Plakat der Firma DANTEC Dynamics A/S, Skovlunde, Dänemark***

[**17**] WINDTEST GmbH — ***Homepage der Firma WINDTEST GmbH, Grevenbroich***
www.windtest-nrw.de

[**18**] ADOLF THIES GmbH & Co. KG — ***Homepage der Firma ADOLF THIES GmbH & Co. KG, Göttingen***
www.thiesclima.com

[**19**] Airflow Lufttechnik GmbH — ***Homepage der Firma Airflow Lufttechnik GmbH, Rheinbach*** www.airflow.cz

[**20**] Einstein.DE GmbH — ***Homepage der Firma Einstein.DE GmbH, Laatzen*** www.einstein.de/pda

[**21**] AMMONIT Gesellschaft für Messtechnik mbH — ***Homepage der Firma AMMONIT Gesellschaft für Messtechnik mbH, Berlin*** www.ammonit.de

[**22**] Universität Zürich — ***Homepage der Universität Zürich*** www.unizh.ch

[**23**] GWU-Umwelttechnik — ***Homepage der Firma GWU-Umwelttechnik, Erftstadt*** www.gwu-group.de

[**24**] ZAMG — ***Homepage der Firma ZAMG, Österreich*** www.zamg.ac.at

[**25**] METEK GmbH — ***Homepage der Firma METEK GmbH, Elmshorn*** www.metek.de

[**26**] Institut für Troposphären-forschung e.V., Leipzig — ***Homepage des Instituts für Troposphärenforschung e.V., Leipzig*** www.tropos.de

[**27**] Theodor Friedrichs & Co. Meteorologische Geräte und Systeme GmbH — ***Homepage der Firma Theodor Friedrichs & Co. Meteorologische Geräte und Systeme GmbH, Schenefeld*** www.th-friedrichs.com

[**28**] R. M. Young Company — ***Homepage der Firma R. M. Young Company, Michigan, USA*** www.rmyoung.com

[**29**] Conrad Electronic GmbH — ***Homepage der Firma Conrad Electronic GmbH*** www.conrad.de

[**30**] Vector Instruments — ***Homepage der Firma Vector Instruments , Wales, England*** www.windspeed.co.uk/home.html

[**31**] MET ONE Instruments, Inc. — ***Homepage der Firma MET ONE Instruments, Inc., Oregon, USA*** www.metone.com

[**32**] Verband der dänischen Windkraftindustrie — ***Homepage des Verbandes der dänischen Windkraftindustrie, Kopenhagen, Dänemark*** www.windpower.dk

Symbolverzeichnis

Zeichen	Einheit	Erklärung
A	m^2	Fläche
a	$\frac{m}{s}$	Schallgeschwindigkeit
A(f)	-	Funktion in Abhängigkeit der Frequenz
A(t)	-	Funktion in Abhängigkeit der Zeit
c	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
$\bar{c}$	$\frac{m}{s}$	mittlere Geschwindigkeit
c‘	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeitsschwankung
c_w	-	Widerstandsbeiwert
f	Hz	Frequenz
f_C	Hz	Grenzfrequenz des Fiberfilmanemometers
F_F	N	vom Fluid ausgeübte dynamische Kraft
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
I	A	elektrischer Strom
K	-	Faktor für die Berechnung der Schallgeschwindigkeit in der feuchten Luft
k	-	Anzahl der Stützstellen
L	m	Distanz zwischen den beiden Transducern eines Ultraschallanemometers
N	s	Länge des Zeitfensters
P	W	Leistung

$\overline{p}$	Pa	mittlerer Druck
p'	Pa	Druckschwankung
p_b	Pa	Barometerstand
p_{dy}	Pa	dynamischer Druck
p_g	Pa	Gesamtdruck
p_{st}	Pa	statischer Druck
R_0	Ω	Widerstand der Fiberfilmsonde bei c=0
R_S	Ω	Widerstand der Fiberfilmsonde bei c>0
T	K	Temperatur
t	s	Zeit
t_-	s	Laufzeit gegen die Strömungsrichtung
t_+	s	Laufzeit in Strömungsrichtung
T_0	°C	Temperatur der Fiberfilmsonde bei c=0
T_S	°C	Temperatur der Fiberfilmsonde bei c>0
Tu	-	Turbulenzgrad
u	$\frac{m}{s}$	Umfangsgeschwindigkeit
U	V	Elektrische Spannung
α	$\frac{1}{°C}$	Temperaturkoeffizient
η	$\frac{kg}{m \cdot s}$	Viskosität, dynamische Zähigkeit
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
κ	-	Isentropenexponent
τ_w	s	Impulsbreite

Beilage zur Diplomarbeit

Name: Deiss
Vorname: Olga
Matr. Nr.: 340479

ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorgelegte Diplomarbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und ausschließlich die im Literaturverzeichnis angegebenen Schriften benutzt habe.

_____ _____

Datum Unterschrift

Beilage zur Diplomarbeit

Name: Lackmann
Vorname: Frank
Matr. Nr.: 338837

ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorgelegte Diplomarbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und ausschließlich die im Literaturverzeichnis angegebenen Schriften benutzt habe.

_____ _____

Datum Unterschrift

Anhang

Visual Basic Programm zur Ansteuerung des Koordinatentisches und automatisierten Aufnahme der Messdaten

```
Declare Sub IX_SENDSTRING Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal a$)
Declare Sub IX_OPENCOM Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal para$)
Declare Sub IX_CLOSECOM Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%)
Option Explicit
Declare Sub IX_SENDBYTE Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal Bytes%)
Declare Sub IX_STRLENGTH Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal Bytes%)
Declare Sub IX_TIMEOUT Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal Bytes%)
Declare Sub TIMEINIT Lib "RSAPI.DLL" ()
Declare Function TIMEREAD Lib "RSAPI.DLL" () As Long
Declare Function IX_STRREAD Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal Display$) As Integer


Sub Zylinder_Profil()

Dim delta_alpha, d_max, n, Zähler10, Zähler20, Spalte_a, Zeile_a, Iselinit, z, y
Dim alpha, ai, Radien, Z1, Z2, Y1, Y2, ages, m, Meßzeile, Meßspalte
Dim newHour, newMinute, newSecond, waitTime, Spalte_b, t1, t2
Dim Schrittez As Integer, Schrittey As Integer, Ursprungz, Ursprungy

'Dim aus Vorprogramm
Dim Zähler1, Zähler2, Zähler3
Dim Display$, Verfahrwegz, Verfahrwegy
Dim Endpunkt
Dim Messdauer, Intervall, Zeit, Zeit_i, t, i, Zeile, Spalte
Dim Zplus1, Zplus2, Zminus1, Zminus2, Yminus1, Yminus2, x, ZZähler, YZähler
Dim Anfang1, Anfang2, Anfang3, ZZähler2$, YZähler2$


'Anfang für Dateneintrag festlegen
   Meßzeile = 30
   Meßspalte = 3

'Werte einlesen
   d_max = Tabelle1.Cells(4, 2).Value
   delta_alpha = Tabelle1.Cells(5, 2).Value
   n = Tabelle1.Cells(6, 2).Value
   t1 = Tabelle1.Cells(10, 6).Value
   t2 = Tabelle1.Cells(11, 6).Value

'Variablen setzen
   Zähler1 = 0
   Zähler10 = 0
   Zähler20 = 0
```

```
    alpha = 0
    Zeile_a = 14
    Spalte_a = 6
    Ursprungz = 0
    Ursprungy = 0
'Variablen für ISEL setzen
    Z1 = "@0A0,3000,0,3000,"
    Z2 = ",3000,0,1000"
    Y1 = "@0A0,3000,"
    Y2 = ",3000,0,3000,0,1000"

'Radien berechnen
    If delta_alpha > 0 Then
        Radien = (180 / delta_alpha) + 1
    Else
        Radien = (180 / -delta_alpha) + 1
    End If

    ages = d_max / 2

'Variablen für Mittelung setzen
    Messdauer = 16500
    Intervall = 1500
    Zeit_i = 0
    i = 0
    t = 0
    Zeile = 10
    Spalte = 2

'COM1 Für ISEL-Steuerung öffnen
    Iselinit = "@07"
    IX_OPENCOM 1, "COM1,19200,N,8,1"
    IX_SENDSTRING 1, Iselinit + Chr$(13)

'COM2 für den Gleichanteil öffnen
    IX_OPENCOM 2, "COM2,9600,N,7,2"
    IX_TIMEOUT 2, 1000   'TimeOut beim Lesen
    IX_STRLENGTH 2, 56  'Länge der übertragenen Zeichenkette

'COM3 für den Wechselanteil öffnen
    IX_OPENCOM 3, "COM3,9600,N,7,2"
    IX_TIMEOUT 3, 1000   'TimeOut beim Lesen
    IX_STRLENGTH 3, 56  'Länge der übertragenen Zeichenkette

'Meldung das Messung läuft
    Tabelle1.Cells(13, 9).Value = "Die Messung läuft. Bitte warten !!!"
    Range("I13").Select
    Selection.Font.Bold = True
    Selection.Font.ColorIndex = 3
    Selection.Font.Size = 14
    Range("C25").Select
```

```
'Anfangspause von 2 Sekunden
    newHour = Hour(Now())
    newMinute = Minute(Now())
    newSecond = Second(Now()) + 2
    waitTime = TimeSerial(newHour, newMinute, newSecond)
    Application.Wait waitTime

'Messung des Mittelpunktes

        TIMEINIT
        While TIMEREAD < Messdauer
        Do
            DoEvents
        Loop Until TIMEREAD >= t
            Zeit = TIMEREAD
            Zeit_i = Zeit_i + Zeit
            i = i + 1

            'Gleichanteil messen
            Display$ = "Mindestens 56 Zeichen12345678901234567890123456789012345678"
            IX_SENDBYTE 2, Asc("D")
            IX_STRREAD 2, Display$
            Tabelle3.Cells(5, Spalte).Value = (Val(Mid$(Display$, 3)))

            'Wechselanteil messen
            Display$ = "Mindestens 56 Zeichen12345678901234567890123456789012345678"
            IX_SENDBYTE 3, Asc("D")
            IX_STRREAD 3, Display$
            Tabelle4.Cells(5, Spalte).Value = (Val(Mid$(Display$, 3)))

            'Eintragen der Zeit in Tabelle3 und Tabelle4
            Tabelle3.Cells(9, Spalte).Value = Zeit / 1000
            Tabelle4.Cells(9, Spalte).Value = Zeit / 1000

            t = t + Intervall
            Spalte = Spalte + 1

        Wend

        'Werte von Tabelle3 und Tabelle4 mitteln und in Tabelle1 und Tabelle2 übertragen
        Tabelle3.Cells(5, Spalte).Value = "=AVERAGE(RC[-10]:RC[-1])"
        Tabelle4.Cells(5, Spalte).Value = "=AVERAGE(RC[-10]:RC[-1])"

        Tabelle1.Cells(25, 3).Value = Tabelle3.Cells(5, Spalte).Value * 10
        Tabelle2.Cells(25, 3).Value = Tabelle4.Cells(5, Spalte).Value * 10

        Spalte = 2
        Zeit_i = 0
        i = 0
        t = 0
```

```
'Pause von 2 Sekunden
   newHour = Hour(Now())
   newMinute = Minute(Now())
   newSecond = Second(Now()) + 2
   waitTime = TimeSerial(newHour, newMinute, newSecond)
   Application.Wait waitTime


'Schleife
Do Until Zähler20 = Radien

      Do Until Zähler10 = n

         z = Cos(alpha * 3.14159265358979 / 180) * Tabelle1.Cells(Zeile_a, 6).Value
         y = Sin(alpha * 3.14159265358979 / 180) * Tabelle1.Cells(Zeile_a, 6).Value

         'Schritte berechnen
         Schrittez = z * 80
         Schrittey = y * 80

         'Zähler für die Ursprungsfahrt
         Ursprungz = Ursprungz + Schrittez
         Ursprungy = Ursprungy + Schrittey

         'z fahren
         IX_SENDSTRING 1, Z1
         IX_SENDSTRING 1, Schrittez
         IX_SENDSTRING 1, Z2 + Chr$(13)

         'y fahren
         IX_SENDSTRING 1, Y1
         IX_SENDSTRING 1, Schrittey
         IX_SENDSTRING 1, Y2 + Chr$(13)

         'Pause von t1 Sekunden
         newHour = Hour(Now())
         newMinute = Minute(Now())
         newSecond = Second(Now()) + t1
         waitTime = TimeSerial(newHour, newMinute, newSecond)
         Application.Wait waitTime

      'Meßschleife für Mittelung
      TIMEINIT
      While TIMEREAD < Messdauer
      Do
         DoEvents
      Loop Until TIMEREAD >= t
         Zeit = TIMEREAD
         Zeit_i = Zeit_i + Zeit
         i = i + 1
```

```
        'Gleichanteil messen
        Display$ = "Mindestens 56 Zeichen12345678901234567890123456789012345678901234567890123456"
        IX_SENDBYTE 2, Asc("D")
        IX_STRREAD 2, Display$
        Tabelle3.Cells(Zeile, Spalte).Value = (Val(Mid$(Display$, 3)))

        'Wechselanteil messen
        Display$ = "Mindestens 56 Zeichen12345678901234567890123456789012345678901234567890123456"
        IX_SENDBYTE 3, Asc("D")
        IX_STRREAD 3, Display$
        Tabelle4.Cells(Zeile, Spalte).Value = (Val(Mid$(Display$, 3)))

        'Eintragen der Zeit in Tabelle3 und Tabelle4
        Tabelle3.Cells(9, Spalte).Value = Zeit / 1000
        Tabelle4.Cells(9, Spalte).Value = Zeit / 1000

        t = t + Intervall
        Spalte = Spalte + 1

    Wend

    'Werte von Tabelle3 und Tabelle4 mitteln und in Tabelle1 und Tabelle2 übertragen
    Tabelle3.Cells(Zeile, Spalte).Value = "=AVERAGE(RC[-10]:RC[-1])"
    Tabelle4.Cells(Zeile, Spalte).Value = "=AVERAGE(RC[-10]:RC[-1])"

    Tabelle1.Cells(Meßzeile, Meßspalte + Zähler1).Value = Tabelle3.Cells(Zeile, Spalte).Value * 10
    Tabelle2.Cells(Meßzeile, Meßspalte + Zähler1).Value = Tabelle4.Cells(Zeile, Spalte).Value * 10

    'Variablen zurücksetzen
    Zeile = Zeile + 1
    Zeit_i = 0
    i = 0
    t = 0
    Spalte = 2
    Zähler1 = Zähler1 + 1
    Zähler10 = Zähler10 + 1
    Zeile_a = Zeile_a + 1

    'Zeitverzögerung von 2 Sekunden
    newHour = Hour(Now())
    newMinute = Minute(Now())
    newSecond = Second(Now()) + 2
    waitTime = TimeSerial(newHour, newMinute, newSecond)
    Application.Wait waitTime

    Loop

'Ursprung anfahren
  Ursprungz = Ursprungz * -1
  Ursprungy = Ursprungy * -1
```

```
'z fahren
    IX_SENDSTRING 1, Z1
    IX_SENDSTRING 1, Ursprungz
    IX_SENDSTRING 1, Z2 + Chr$(13)

'y fahren
    IX_SENDSTRING 1, Y1
    IX_SENDSTRING 1, Ursprungy
    IX_SENDSTRING 1, Y2 + Chr$(13)

'Variablen zurücksetzen
    Ursprungz = 0
    Ursprungy = 0
    Meßzeile = Meßzeile + 1
    Meßspalte = 3
    alpha = alpha + delta_alpha
    Zähler1 = 0
    Zähler10 = 0
    Zähler20 = Zähler20 + 1
    Zeile_a = 14

'Pause von t2 Sekunden
    newHour = Hour(Now())
    newMinute = Minute(Now())
    newSecond = Second(Now()) + t2
    waitTime = TimeSerial(newHour, newMinute, newSecond)
    Application.Wait waitTime

Loop


'COM Ports schließen
    IX_CLOSECOM 1
    IX_CLOSECOM 2
    IX_CLOSECOM 3

'Abschlußmitteilung
    Sheets("Gleichanteil").Select
    Range("I13").Select
    Selection.ClearContents

    m = MsgBox("Die Messung ist abgeschlossen !", 0, "Geschwindigkeitsprofil")

End Sub
```

Kalibrierprotokolle Young 12102

report of

Normalanströmung

anemometer manufacturer:	Young
type:	Schalenkreuz
serial number:	12102
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:	1015,9 hPa
air temperature:	22,1 °C
humidity:	38,5 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

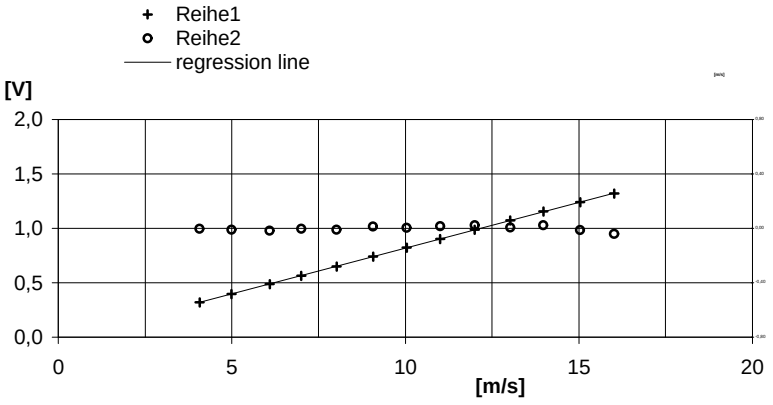
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	voltage at speed [V]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,266 [m/s]+ 11,8926 [m/s]/[V]*voltage	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		[m/s]
0,99998		correlation coefficient ²		



voltage at 4.0 [m/s]	0,31 [V]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,00 [m/s]=	0,0 %	wind speed at 0,5 [V]	6,2 [m/s]
voltage at 8.0 [m/s]	0,65 [V]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,01 [m/s]=	0,1 %	wind speed at 1,0 [V]	12,2 [m/s]
voltage at 12.0 [m/s]	0,99 [V]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,02 [m/s]=	0,19 %	wind speed at 1,5 [V]	18,1 [m/s]
voltage at 16.0 [m/s]	1,32 [V]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,04 [m/s]=	0,25 %		

Remarks

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

report of

Schräganströmung von ca. 10°

anemometer manufacturer:	Young
type:	Schalenkreuz
serial number:	12102
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:	1015,9 hPa
air temperature:	22,1 °C
humidity:	37,5 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

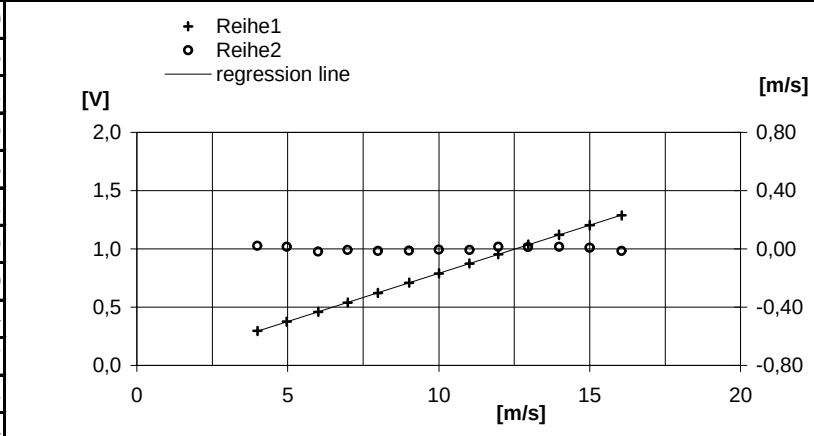
optional: second calibration

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 Ultraschallanemonmetern für den Einsatz an Windkraftanlagen

f i r s t **s e c o n d**

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			
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		[m/s]
0,999988		correlation coefficient ²		

voltage at 4.0 [m/s]	0,29 [V]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,02 [m/s]=	0,5 %	wind speed at 0,5 [V]	6,5 [m/s]
voltage at 8.0 [m/s]	0,62 [V]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,01 [m/s]=	0,18 %	wind speed at 1,0 [V]	12,5 [m/s]
voltage at 12.0 [m/s]	0,95 [V]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,01 [m/s]=	0,11 %	wind speed at 1,5 [V]	18,6 [m/s]
voltage at 16.0 [m/s]	1,29 [V]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,01 [m/s]=	0,09 %		

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:

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:	38,5 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

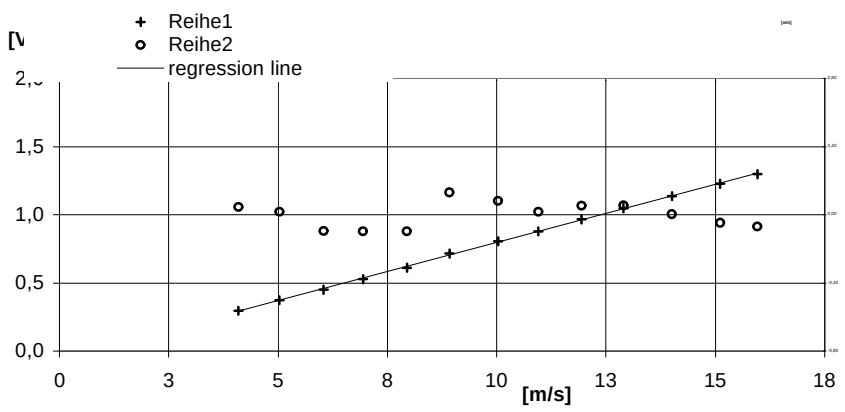
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	voltage at speed [V]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,659 [m/s]+ 11,7358 [m/s]/[V]*voltage	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 ²		



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:	-

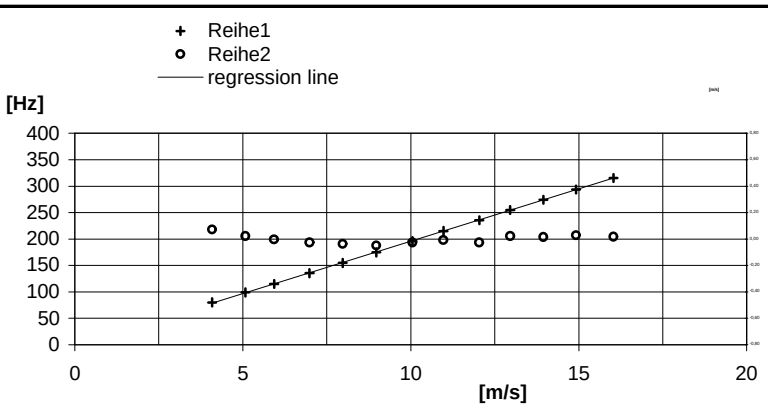
optional: second calibration

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 Ultraschallanemonmetern für den Einsatz an Windkraftanlagen

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,104 [m/s]+ 0,05053 [m/s]/[Hz]*frequency	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		[m/s]
0,999926		correlation coefficient ²		

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

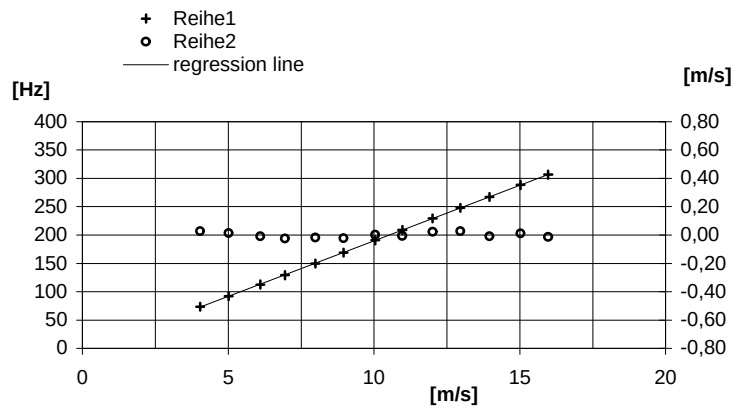
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,335 [m/s]+ 0,05097 [m/s]/[Hz]*frequency	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 ²		



frequency at 4.0 [m/s]	71,91 [Hz]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,03 [m/s]=	0,67 %	wind speed at 80,0 [Hz]	4,412 [m/s]
frequency at 8.0 [m/s]	150,38 [Hz]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,02 [m/s]=	0,22 %	wind speed at 160,0 [Hz]	8,490 [m/s]
frequency at 12.0 [m/s]	228,86 [Hz]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,02 [m/s]=	0,18 %	wind speed at 320,0 [Hz]	16,645 [m/s]
frequency at 16.0 [m/s]	307,34 [Hz]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,01 [m/s]=	0,08 %		

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:

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:	-

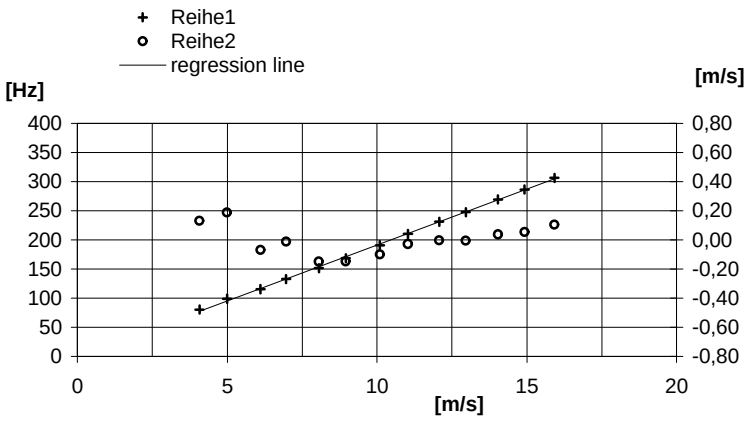
optional: second calibration

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 Ultraschallanemonmetern für den Einsatz an Windkraftanlagen

f i r s t **s e c o n d**

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		[m/s]
0,999287		correlation coefficient ²		

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

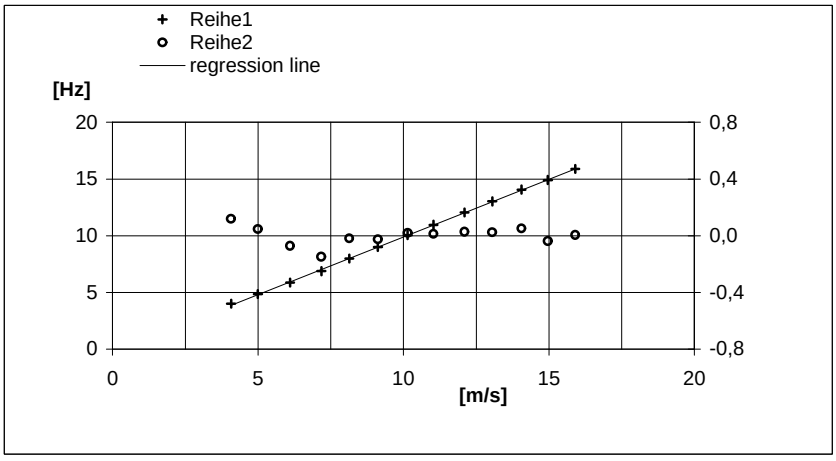
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	speed [m/s]	regression line (4 to 16 m/s): 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 ²		



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

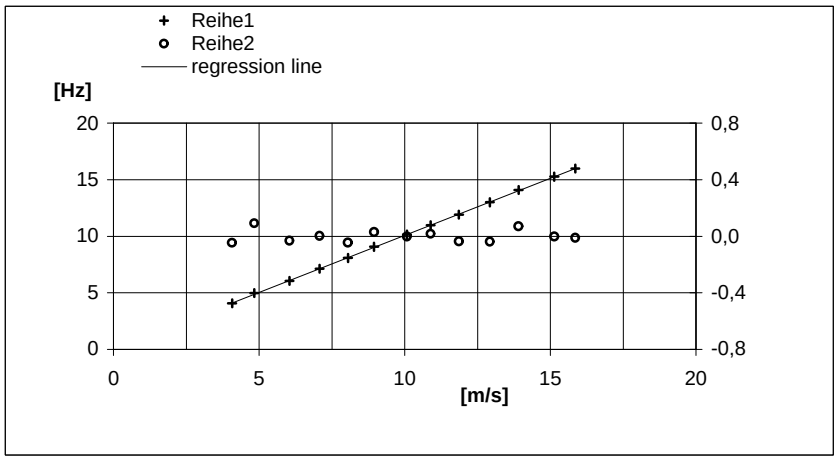
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	speed [m/s]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= -0,001 [m/s]+ 0,99168 [m/s]/[Hz]*frequency	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 ²		



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:	WGTMT282
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:	1010,3 hPa
air temperature:	21,4 °C
humidity:	42,4 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

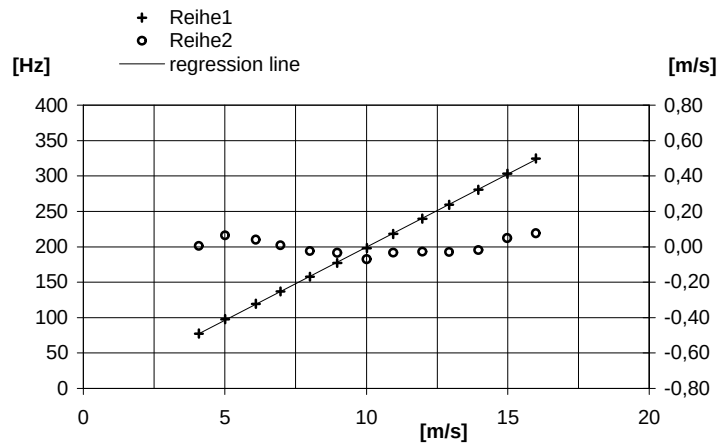
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,341 [m/s]+ 0,04844 [m/s]/[Hz]*frequency	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		[m/s]
0,999866		correlation coefficient ²		



frequency at 4.0 [m/s]	75,54 [Hz]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,00 [m/s]=	0,12 %	wind speed at 80,0 [Hz]	4,216 [m/s]
frequency at 8.0 [m/s]	158,12 [Hz]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,03 [m/s]=	0,32 %	wind speed at 160,0 [Hz]	8,091 [m/s]
frequency at 12.0 [m/s]	240,69 [Hz]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,03 [m/s]=	0,23 %	wind speed at 320,0 [Hz]	15,841 [m/s]
frequency at 16.0 [m/s]	323,27 [Hz]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,08 [m/s]=	0,47 %		

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

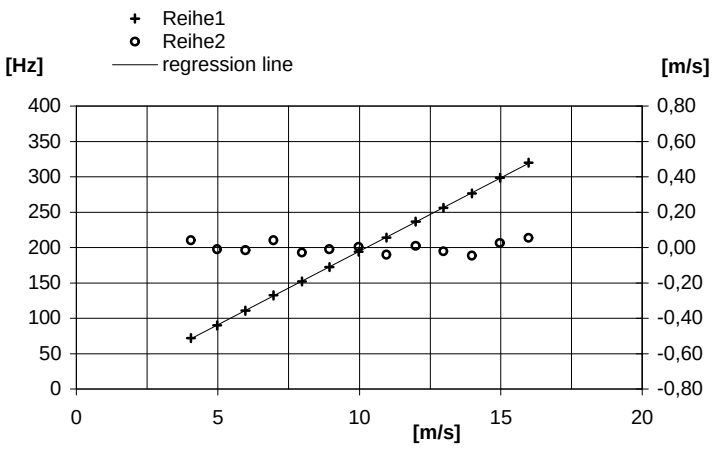
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,641 [m/s]+ 0,04807 [m/s]/[Hz]*frequency	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 ²		



frequency at 4.0 [m/s]	69,88 [Hz]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,04 [m/s]=	0,99 %	wind speed at 80,0 [Hz]	4,486 [m/s]
frequency at 8.0 [m/s]	153,09 [Hz]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,03 [m/s]=	0,36 %	wind speed at 160,0 [Hz]	8,332 [m/s]
frequency at 12.0 [m/s]	236,31 [Hz]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,01 [m/s]=	0,06 %	wind speed at 320,0 [Hz]	16,023 [m/s]
frequency at 16.0 [m/s]	319,52 [Hz]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,06 [m/s]=	0,35 %		

Remarks

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

report of

turbulente Anströmung von ca. 6%

anemometer manufacturer:	Thies / Windtest
type:	4.3303.22.000
serial number:	WTGMT282
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:	1011,0 hPa
air temperature:	22,7 °C
humidity:	42,1 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

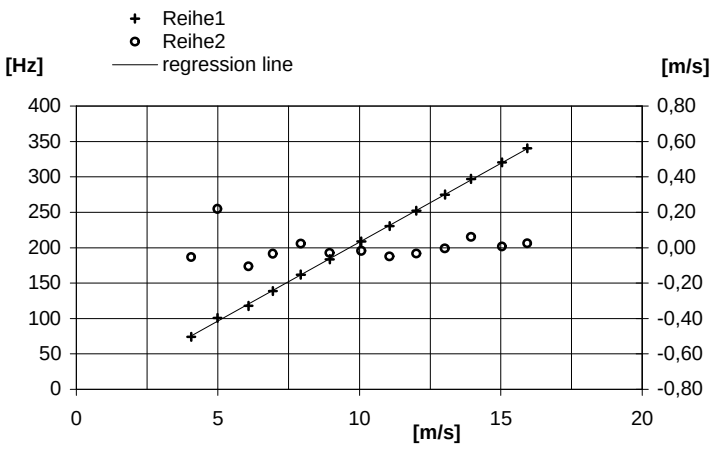
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,696 [m/s]+ 0,04482 [m/s]/[Hz]*frequency	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		[m/s]
0,9996		correlation coefficient ²		



frequency at 4.0 [m/s]	73,71 [Hz]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,05 [m/s]=	1,31 %	wind speed at 80,0 [Hz]	4,282 [m/s]
frequency at 8.0 [m/s]	162,95 [Hz]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,02 [m/s]=	0,29 %	wind speed at 160,0 [Hz]	7,868 [m/s]
frequency at 12.0 [m/s]	252,19 [Hz]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,03 [m/s]=	0,27 %	wind speed at 320,0 [Hz]	15,039 [m/s]
frequency at 16.0 [m/s]	341,44 [Hz]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,02 [m/s]=	0,15 %		

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

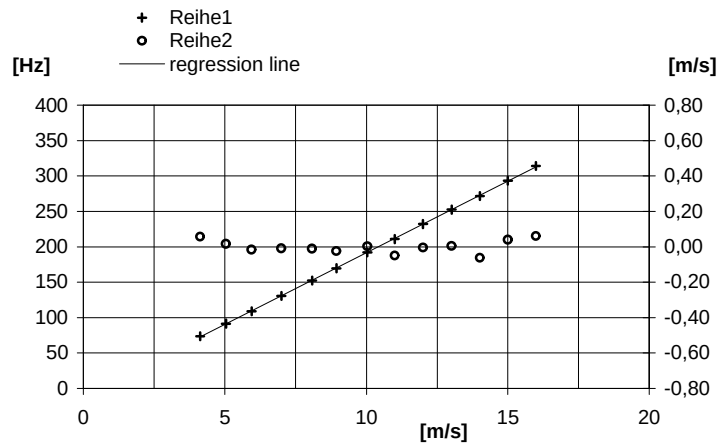
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,552 [m/s]+ 0,04935 [m/s]/[Hz]*frequency	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,13	73,65			
5,94	108,86			
8,08	152,26			
10,04	192,23			
12,01	232,00			
14,02	271,59			
15,99	314,05			
15,00	293,50			
13,01	252,50			
11,01	210,77			
8,94	169,45			
6,99	130,32			
5,04	91,18			
0,0369 [m/s]		standard deviation		[m/s]
0,999909		correlation coefficient ²		



frequency at 4.0 [m/s]	69,86 [Hz]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,06 [m/s]=	1,38 %	wind speed at 80,0 [Hz]	4,501 [m/s]
frequency at 8.0 [m/s]	150,91 [Hz]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,01 [m/s]=	0,14 %	wind speed at 160,0 [Hz]	8,449 [m/s]
frequency at 12.0 [m/s]	231,95 [Hz]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,00 [m/s]=	0,04 %	wind speed at 320,0 [Hz]	16,345 [m/s]
frequency at 16.0 [m/s]	313,00 [Hz]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,06 [m/s]=	0,38 %		

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:	-

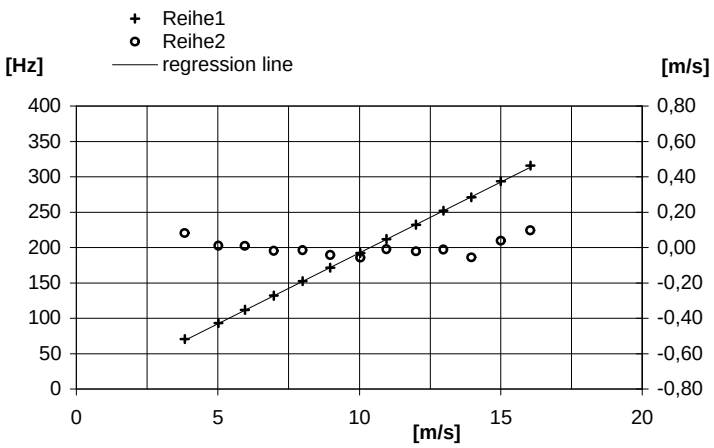
optional: second calibration

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 Ultraschallanemonmetern für den Einsatz an Windkraftanlagen

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,390 [m/s]+ 0,04988 [m/s]/[Hz]*frequency	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		[m/s]
0,999853		correlation coefficient ²		

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%

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:	1011,1 hPa
air temperature:	23,6 °C
humidity:	25,8 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

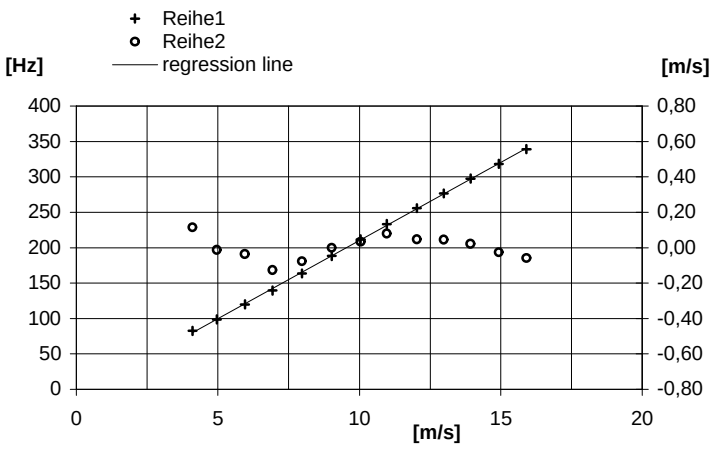
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,487 [m/s]+ 0,04529 [m/s]/[Hz]*frequency	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,10	82,36			
5,95	119,89			
7,97	163,52			
10,05	211,79			
12,03	255,95			
13,93	297,36			
15,91	339,20			
14,93	318,36			
12,98	276,82			
10,97	233,23			
9,02	188,49			
6,94	139,63			
4,96	98,55			
0,0663 [m/s]		standard deviation		[m/s]
0,999706		correlation coefficient ²		



frequency at 4.0 [m/s]	77,57 [Hz]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,11 [m/s]=	2,79 %	wind speed at 80,0 [Hz]	4,110 [m/s]
frequency at 8.0 [m/s]	165,90 [Hz]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,08 [m/s]=	0,97 %	wind speed at 160,0 [Hz]	7,733 [m/s]
frequency at 12.0 [m/s]	254,22 [Hz]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,05 [m/s]=	0,39 %	wind speed at 320,0 [Hz]	14,979 [m/s]
frequency at 16.0 [m/s]	342,54 [Hz]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,06 [m/s]=	0,37 %		

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:

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:	993,1384615 hPa
air temperature:	23,0 °C
humidity:	40,3 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

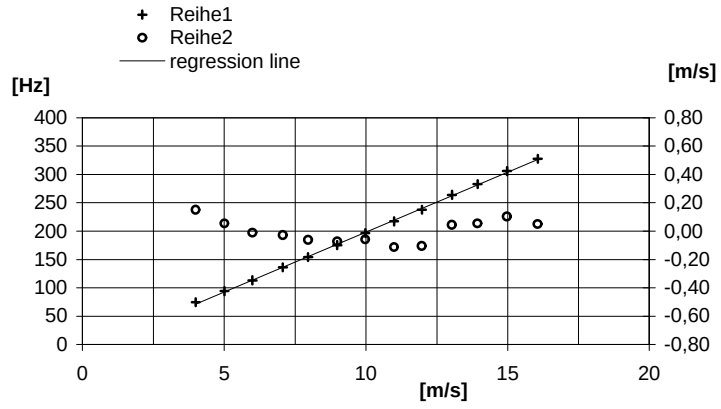
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

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 ²		



frequency at 4.0 [m/s]	71,36 [Hz]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,15 [m/s]=	3,76 %	wind speed at 80,0 [Hz] 4,408 [m/s]
frequency at 8.0 [m/s]	156,11 [Hz]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,06 [m/s]=	0,8 %	wind speed at 160,0 [Hz] 8,183 [m/s]
frequency at 12.0 [m/s]	240,87 [Hz]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,11 [m/s]=	0,88 %	wind speed at 320,0 [Hz] 15,734 [m/s]
frequency at 16.0 [m/s]	325,63 [Hz]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,05 [m/s]=	0,31 %	

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

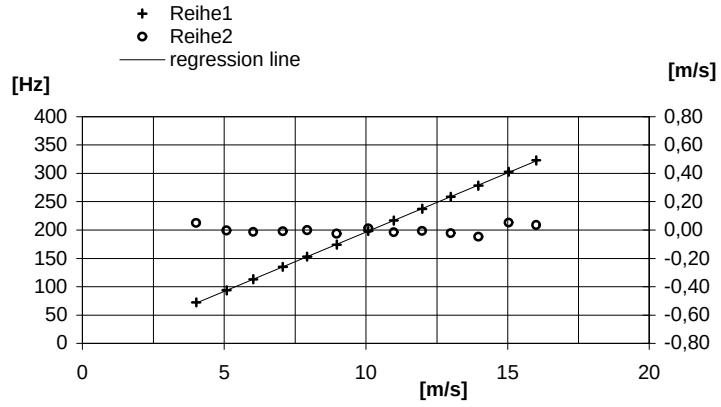
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,615 [m/s]+ 0,04781 [m/s]/[Hz]*frequency	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 ²		



frequency at 4.0 [m/s]	70,80 [Hz]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,05 [m/s]=	1,27 %	wind speed at 80,0 [Hz]	4,440 [m/s]
frequency at 8.0 [m/s]	154,47 [Hz]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,00 [m/s]=	0,03 %	wind speed at 160,0 [Hz]	8,265 [m/s]
frequency at 12.0 [m/s]	238,14 [Hz]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,01 [m/s]=	0,06 %	wind speed at 320,0 [Hz]	15,914 [m/s]
frequency at 16.0 [m/s]	321,80 [Hz]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,03 [m/s]=	0,22 %		

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

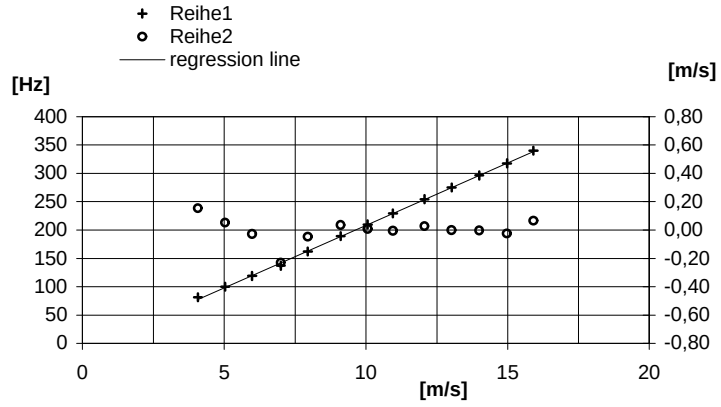
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,546 [m/s]+ 0,0454 [m/s]/[Hz]*frequency	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 ²		



frequency at 4.0 [m/s]	76,08 [Hz]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,15 [m/s]=	3,78 %	wind speed at 80,0 [Hz]	4,178 [m/s]
frequency at 8.0 [m/s]	164,20 [Hz]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,05 [m/s]=	0,61 %	wind speed at 160,0 [Hz]	7,809 [m/s]
frequency at 12.0 [m/s]	252,31 [Hz]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,03 [m/s]=	0,22 %	wind speed at 320,0 [Hz]	15,073 [m/s]
frequency at 16.0 [m/s]	340,43 [Hz]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,07 [m/s]=	0,41 %		

Remarks

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

Friedrichs 4033.1100 WTGMT 156

report of

Normalanströmung

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:	993,0846154 hPa
air temperature:	22,8 °C
humidity:	30,3 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

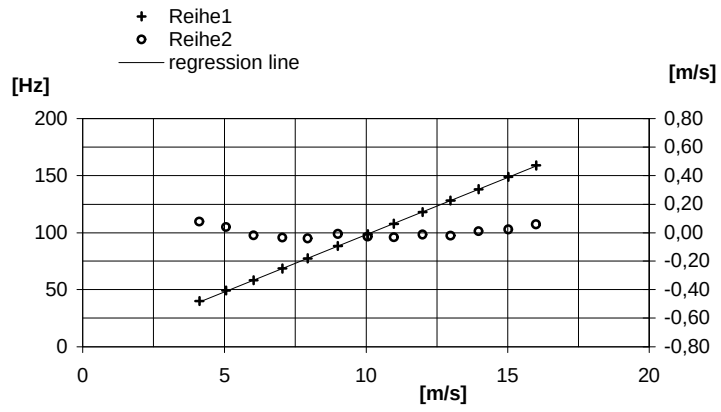
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,183 [m/s]+ 0,09986 [m/s]/[Hz]*frequency	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,11	40,14			
6,03	58,34			
7,95	77,34			
10,06	98,64			
12,00	118,16			
13,97	138,18			
16,00	158,98			
15,02	148,80			
12,98	127,98			
10,98	107,82			
9,01	88,25			
7,05	68,39			
5,07	49,30			
0,0380 [m/s]		standard deviation		[m/s]
0,999903		correlation coefficient ²		



frequency at 4.0 [m/s]	38,23 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	78,28 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	118,34 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	158,40 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,08 [m/s]=	1,87 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,04 [m/s]=	0,51 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,01 [m/s]=	0,12 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,06 [m/s]=	0,36 %

wind speed at 80,0 [Hz]	8,171 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	16,160 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	32,137 [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

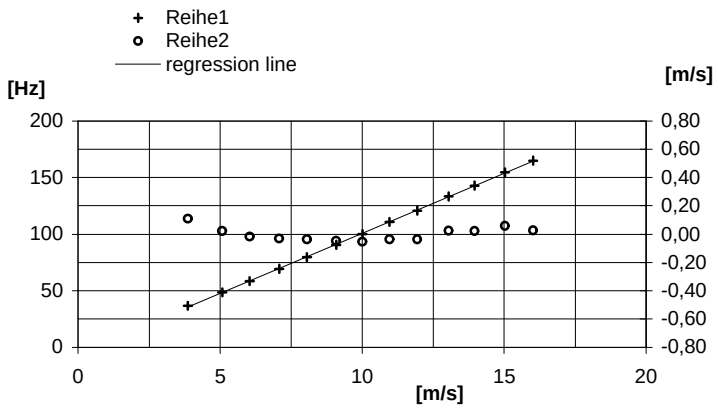
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

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		[m/s]
0,999844		correlation coefficient ²		



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%

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

WINDTEST KWK GmbH

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

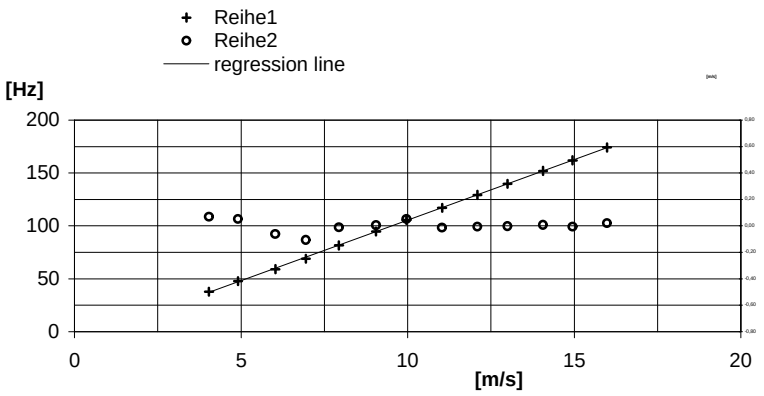
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

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]*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		[m/s]
0,999858		correlation coefficient ²		



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

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:	1012,923077 hPa
air temperature:	22,3 °C
humidity:	40,7 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

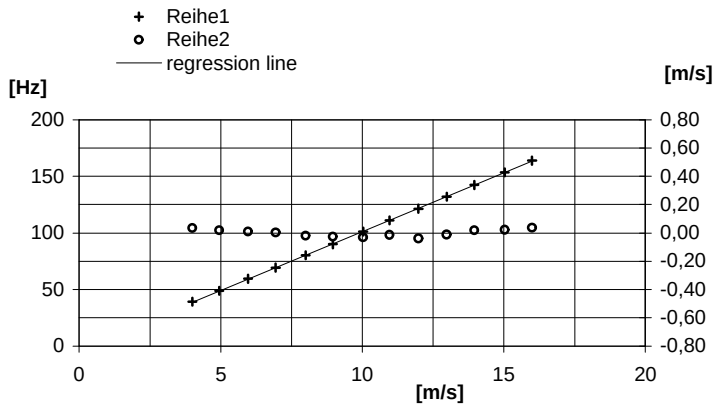
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,266 [m/s]+ 0,09627 [m/s]/[Hz]*frequency	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,01	39,23			
5,97	59,36			
8,00	80,16			
10,04	101,16			
11,99	121,33			
13,96	142,47			
16,00	163,86			
15,03	153,64			
12,98	131,93			
10,97	111,00			
8,96	90,02			
6,94	69,35			
4,95	48,84			
0,0257 [m/s]		standard deviation		[m/s]
0,999957		correlation coefficient ²		



frequency at 4.0 [m/s]	38,79 [Hz]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,04 [m/s]=	0,87 %	wind speed at 80,0 [Hz]	7,967 [m/s]
frequency at 8.0 [m/s]	80,34 [Hz]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,02 [m/s]=	0,25 %	wind speed at 160,0 [Hz]	15,669 [m/s]
frequency at 12.0 [m/s]	121,89 [Hz]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,04 [m/s]=	0,33 %	wind speed at 320,0 [Hz]	31,072 [m/s]
frequency at 16.0 [m/s]	163,44 [Hz]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,04 [m/s]=	0,24 %		

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

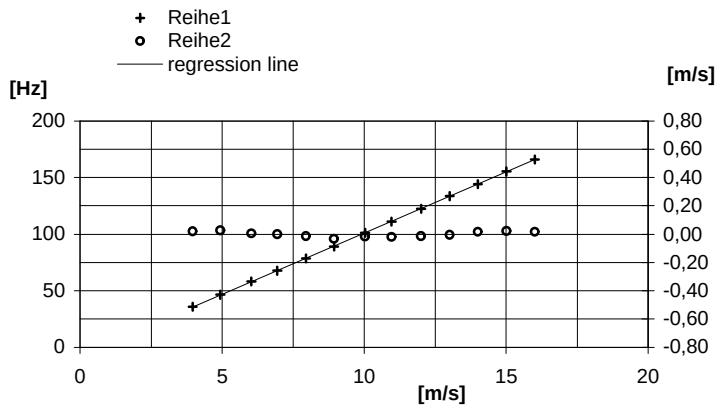
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

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 ²		



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:

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:	1013,284615 hPa
air temperature:	23,4 °C
humidity:	40,7 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

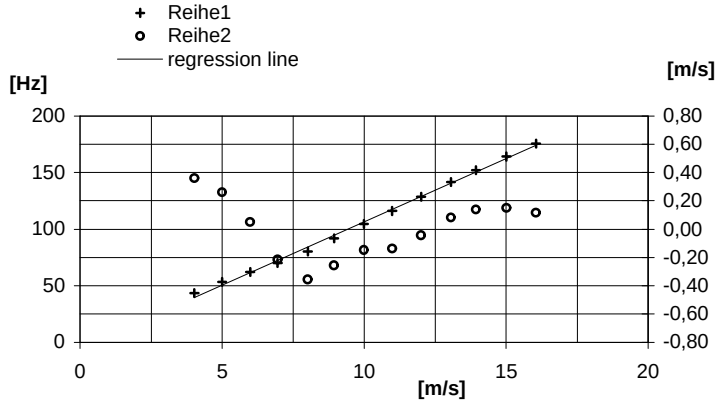
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

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		[m/s]
0,997037		correlation coefficient ²		



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

FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

anemometer manufacturer:	MetOne
type:	Schalenkreuz (Kegelig)
serial number:	EW0100016 / Y1165
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:	1002,461538 hPa
air temperature:	21,8 °C
humidity:	43,1 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

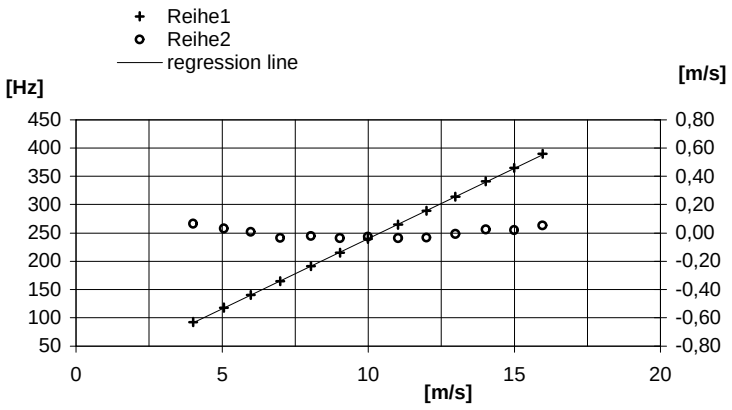
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,333 [m/s]+ 0,04023 [m/s]/[Hz]*frequency	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,00	92,75			
5,97	140,32			
8,04	191,05			
9,99	239,44			
11,99	288,91			
14,03	340,95			
15,97	389,86			
14,99	364,82			
12,98	314,14			
11,02	264,73			
9,03	215,16			
6,99	164,59			
5,06	118,16			
0,0359 [m/s]		standard deviation		[m/s]
0,999915		correlation coefficient ²		



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 (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:	1003,215385 hPa
air temperature:	22,4 °C
humidity:	39,9 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

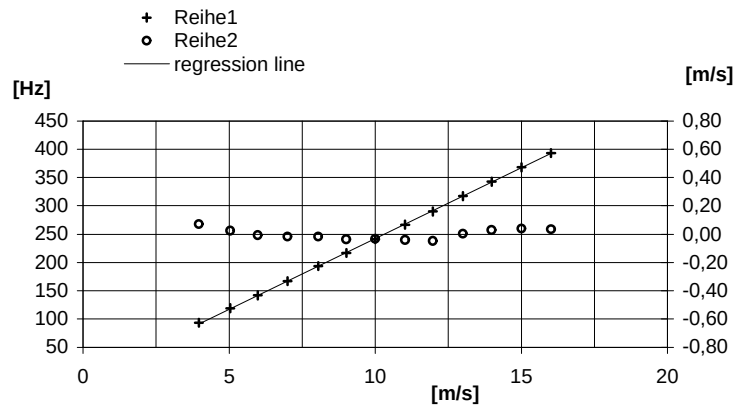
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

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		[m/s]
0,999911		correlation coefficient ²		



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%

FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

anemometer manufacturer:	MetOne
type:	Schalenkreuz (Kegelig)
serial number:	EW0100016 / Y1165
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:	1002,461538 hPa
air temperature:	23,2 °C
humidity:	42,0 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

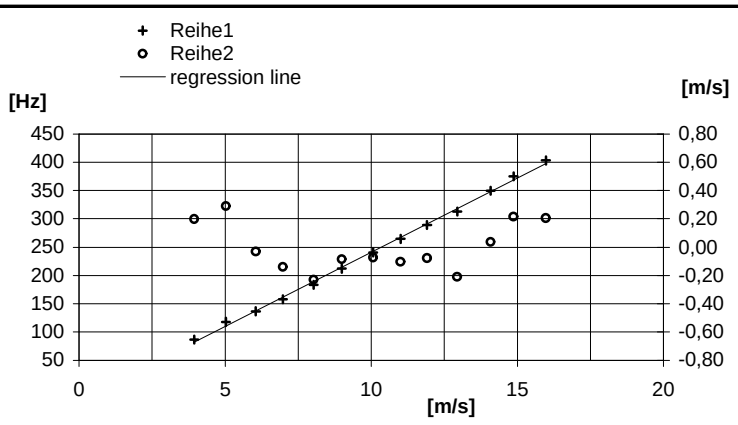
optional: second calibration

date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
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 Ultraschallanemonmetern für den Einsatz an Windkraftanlagen

f i r s t **s e c o n d**

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		[m/s]
0,998001		correlation coefficient ²		

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

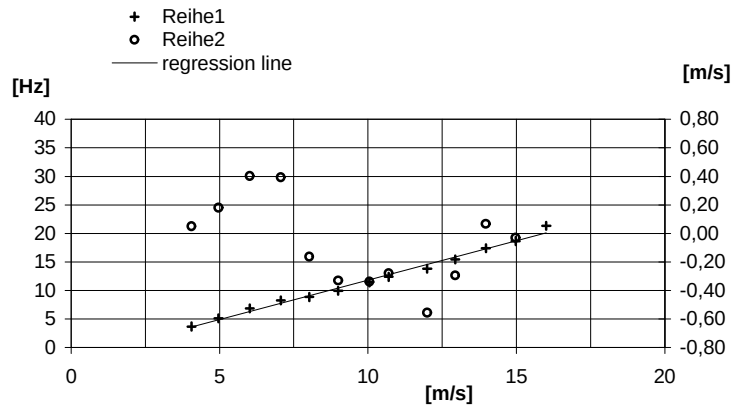
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 1,442 [m/s]+ 0,72452 [m/s]/[Hz]*frequency	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,05	3,67			
6,01	6,86			
8,03	8,86			
10,05	11,42			
11,99	13,80			
13,97	17,39			
16,01	21,34			
14,97	18,64			
12,93	15,45			
10,69	12,39			
9,00	9,98			
7,06	8,30			
4,97	5,11			
0,3959 [m/s]		standard deviation		[m/s]
0,989651		correlation coefficient ²		



frequency at 4.0 [m/s]	3,53 [Hz]	meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,05 [m/s]=	1,24 %	wind speed at 80,0 [Hz]	59,404 [m/s]
frequency at 8.0 [m/s]	9,05 [Hz]	meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,16 [m/s]=	2,03 %	wind speed at 160,0 [Hz]	117,37 [m/s]
frequency at 12.0 [m/s]	14,57 [Hz]	meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,56 [m/s]=	4,63 %	wind speed at 320,0 [Hz]	233,29 [m/s]
frequency at 16.0 [m/s]	20,09 [Hz]	meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,90 [m/s]=	5,6 %		

Remarks

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

report of

Schräganströmung von ca. 10°

FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF

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

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:	1008,961538 hPa
air temperature:	22,0 °C
humidity:	26,7 %
position factor:	-
calibration P Pra, IfS:	-
software version:	-

optional: second calibration

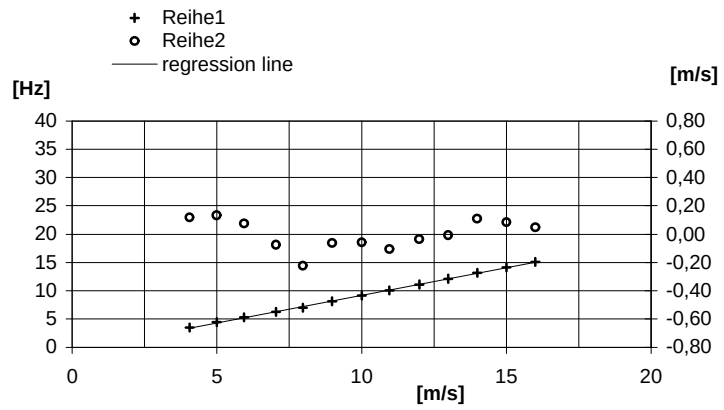
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	regression line (4 to 16 m/s): V[m/s]= 0,553 [m/s]+ 1,02814 [m/s]/[Hz]*frequency	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,06	3,52			
5,94	5,32			
7,97	7,00			
10,00	9,14			
11,99	11,09			
14,00	13,18			
16,00	15,07			
15,01	14,14			
12,99	12,09			
10,96	10,02			
8,98	8,14			
7,05	6,25			
5,00	4,45			
0,1057 [m/s]		standard deviation		[m/s]
0,999261		correlation coefficient ²		



frequency at 4.0 [m/s]	3,35 [Hz]
frequency at 8.0 [m/s]	7,24 [Hz]
frequency at 12.0 [m/s]	11,13 [Hz]
frequency at 16.0 [m/s]	15,02 [Hz]

meas. Uncertainty at 4.0 [m/s]	0,12 [m/s]=	2,9 %
meas. Uncertainty at 8.0 [m/s]	0,23 [m/s]=	2,82 %
meas. Uncertainty at 12.0 [m/s]	0,04 [m/s]=	0,3 %
meas. Uncertainty at 16.0 [m/s]	0,05 [m/s]=	0,3 %

wind speed at 80,0 [Hz]	82,804 [m/s]
wind speed at 160,0 [Hz]	165,06 [m/s]
wind speed at 320,0 [Hz]	329,56 [m/s]

Remarks

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

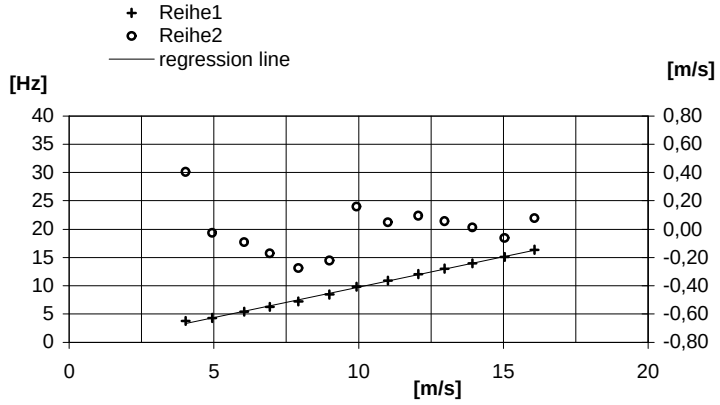
date of calibration:	
data file:	
air pressure:	
air temperature:	
humidity:	
psition factor:	
calibration P Pra, IfS:	
software version:	

the complete procedure is documentet in the diploma thesis

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

f i r s t **s e c o n d**

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]*frequency	flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]
4,03	3,77			
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 ²		



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)

Vergleich der Kalibrierung KWK und FH Düsseldorf

manufacture	Thies
type	4.3303.22.0000
serial Numbe	WTGMT 280

y = 20.261825x - 11.188633

19.03.01 14.02.01 (-0,516+A11)/0,047

m/s	Fh Düsseldorf		WT KWK		Hz	Hz	Abweichung Hz	Abweichung %	Abweichung %
c	c	f	c	f	f_FH	f_WT	delta_f	delta	abs_delta
4	4,13	73,65	3,91	73,31	69,86	74,13	-4,27	-6,111	6,111
6	5,94	108,86	5,95	115,38	110,38	116,68	-6,30	-5,706	5,706
8	8,08	152,26	7,99	158,27	150,91	159,23	-8,33	-5,519	5,519
10	10,04	192,23	10,03	202,46	191,43	201,79	-10,36	-5,411	5,411
12	12,01	232	12,06	245,68	231,95	244,34	-12,39	-5,340	5,340
14	14,02	271	14,06	287,96	272,48	286,89	-14,42	-5,291	5,291
16	15,99	314,05	16,1	332,1	313,00	329,45	-16,45	-5,254	5,254
15	15	293,5	15,08	310,11	292,74	308,17	-15,43	-5,271	5,271
13	13,01	252,5	13,05	266,77	252,22	265,62	-13,40	-5,314	5,314
11	11	210,77	11,04	224,37	211,69	223,06	-11,37	-5,372	5,372
9	8,94	169,45	9,01	180,5	171,17	180,51	-9,34	-5,458	5,458
7	6,99	130,32	6,99	136,78	130,64	137,96	-7,31	-5,598	5,598
5	5,04	91,18	4,94	96,47	90,12	95,40	-5,28	-5,863	5,863
Mittelwert								-5,501	5,501

manufacture	Thies
type	4.3303.22.0000
serial Numbe	WTGMT 282

y=20,644584x - 7,041023

11.04.01 27.07.00 (-0,586+A11)/0,04650

m/s	Fh Düsseldorf		WT KWK		Hz	Hz	Abweichung Hz	Abweichung %	Abweichung %
c	c	f	c	f	f_FH	f_WT	delta_f	delta	abs_delta
4	4,09	77,43	4,03	75,38	75,54	73,42	2,12	2,804	2,804
6	6,09	195,5	6,02	116,85	116,83	116,43	0,40	0,339	0,339
8	8	157,64	8,05	159,13	158,12	159,44	-1,33	-0,838	0,838
10	10,01	198,18	10,05	203,46	199,40	202,45	-3,05	-1,528	1,528
12	11,99	238,83	12,06	246,72	240,69	245,46	-4,77	-1,981	1,981
14	13,96	280,73	14,03	289,44	281,98	288,47	-6,49	-2,302	2,302
16	15,99	324,65	16,08	333,78	323,27	331,48	-8,21	-2,540	2,540
15	14,98	303,27	15,06	311,6	302,63	309,98	-7,35	-2,429	2,429
13	13,93	259,35	13,05	268,01	261,34	266,97	-5,63	-2,154	2,154
11	10,95	218,27	11,06	224,97	220,05	223,96	-3,91	-1,776	1,776
9	8,97	177,41	9,5	181,19	178,76	180,95	-2,19	-1,223	1,223
7	6,97	137	7,04	138,03	137,47	137,94	-0,46	-0,338	0,338
5	5,01	97,73	5,04	96,47	96,18	94,92	1,26	1,307	1,307
Mittelwert								-0,974	1,658

manufact.:	Friedrichs
type	40.331.100
serial nr.:	WTGMT 156

y = 10.014298x - 1.830966

21.03.01 01.03.00 (-0,364+x)/0,09542

m/s	Fh Düsseldorf		WT KWK		Hz	Hz	dHz	Abweichung %	Abweichung %
c	c	f	c	f	f_FH	f_WT	delta_f	delta	abs_delta
4	4,11	40,14	3,98	38,21	38,23	38,11	0,12	0,317	0,317
6	6,03	58,34	6	59,15	58,25	59,07	-0,81	-1,391	1,391
8	7,95	77,34	8,03	80,33	78,28	80,03	-1,74	-2,225	2,225
10	10,06	98,64	10,06	101,4	98,31	100,99	-2,67	-2,719	2,719
12	12	118,16	12,09	122,58	118,34	121,95	-3,60	-3,046	3,046
14	13,97	138,18	14,08	143,67	138,37	142,91	-4,54	-3,278	3,278
16	16	158,98	16,13	165,72	158,40	163,87	-5,47	-3,452	3,452
15	15,02	148,8	15,11	154,61	148,38	153,39	-5,00	-3,371	3,371
13	12,98	127,98	13,08	133,15	128,35	132,43	-4,07	-3,171	3,171
11	10,98	107,82	11,07	111,92	108,33	111,47	-3,14	-2,898	2,898
9	9,01	88,25	9,05	90,88	88,30	90,51	-2,21	-2,500	2,500
7	7,05	68,39	7,02	69,56	68,27	69,55	-1,28	-1,869	1,869
5	5,07	49,3	5	48,74	48,24	48,59	-0,34	-0,714	0,714
Mittelwert								-2,332	2,381

manufact.:	Friedrichs
type	40.331.100
serial nr.:	WTGMT 080/6

y = 10,387700x - 2,763523

11.04.01 10.11.00 (-0,302+x)/0,09562

m/s	Fh Düsseldorf		WT KWK		Hz	Hz	dHz	Abweichung %	Abweichung %
c	c	f	c	f	f_FH	f_WT	delta_f	delta	abs_delta
4	4,01	39,23	3,91	38,08	38,79	38,67	0,11	0,292	0,292
6	5,97	59,36	5,97	59,3	59,56	59,59	-0,03	-0,046	0,046
8	8	80,16	8	80,39	80,34	80,51	-0,17	-0,209	0,209
10	10,04	101,16	10,03	101,53	101,11	101,42	-0,31	-0,305	0,305
12	11,99	121,33	12,06	122,94	121,89	122,34	-0,45	-0,369	0,369
14	13,96	142,47	14,05	143,74	142,66	143,25	-0,59	-0,414	0,414
16	16	163,86	16,11	165,61	163,44	164,17	-0,73	-0,447	0,447
15	15,03	153,64	15,07	154,58	153,05	153,71	-0,66	-0,432	0,432
13	12,98	131,93	13,05	133,24	132,28	132,80	-0,52	-0,393	0,393
11	10,97	11	11,05	112,22	111,50	111,88	-0,38	-0,340	0,340
9	8,96	90,02	9,02	91,08	90,73	90,96	-0,24	-0,263	0,263
7	6,94	69,35	9,68	69,67	69,95	70,05	-0,10	-0,140	0,140
5	4,95	48,84	4,96	48,83	49,17	49,13	0,04	0,087	0,087
Mittelwert								-0,229	0,287

manufact.:	Vector
type	A100L2
serial nr.:	WTGMT 501

y = 19,788736x - 2,056151

11.04.01 26.05.00 (-0,306+x)/0,04998

m/s	Fh Düsseldorf		WT KWK		Hz	Hz	dHz	Abweichung %	Abweichung %
c	c	f	c	f	f_FH	f_WT	delta_f	delta	abs_delta
4	4,08	80,14	3,95	73,13	77,10	73,91	3,19	4,137	4,137
6	5,93	115,16	5,97	113,89	116,68	113,93	2,75	2,358	2,358
8	7,97	154,88	7,99	153,91	156,25	153,94	2,31	1,480	1,480
10	10,05	196,23	10,01	193,95	195,83	193,96	1,87	0,957	0,957
12	12,04	235,57	12,02	234,52	235,41	233,97	1,44	0,610	0,610
14	13,95	274,27	14	274,03	274,99	273,99	1,00	0,362	0,362
16	16,03	315,48	16,05	315,3	314,56	314,01	0,56	0,177	0,177
15	14,92	293,75	15,05	294,69	294,77	294,00	0,78	0,264	0,264
13	12,96	254,93	13,01	253,84	255,20	253,98	1,22	0,476	0,476
11	10,97	214,86	11,02	214,12	215,62	213,97	1,65	0,767	0,767
9	8,97	174,55	9	173,68	176,04	173,95	2,09	1,189	1,189
7	6,99	135,68	6,99	133,51	136,47	133,93	2,53	1,855	1,855
5	5,08	98,86	4,98	93,33	96,89	93,92	2,97	3,065	3,065
Mittelwert								1,361	1,361

Mittelung der Geschwindigkeit vor dem Umbau

Mittelung der Geschwindigkeit

Quelldatei: x30_5ms.xls

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	4,9275	5,040	5,012	5,086	5,080	4,409	2,874
45	4,9275	4,935	4,972	5,004	4,977	4,258	2,682
90	4,9275	4,929	4,959	4,990	4,937	3,987	2,464
135	4,9275	4,906	4,942	4,964	5,005	4,449	2,860
180	4,9275	5,052	5,057	5,052	5,062	4,902	3,564
225	4,9275	5,033	5,039	5,033	4,987	4,357	2,974
270	4,9275	5,014	5,002	5,017	5,010	4,203	2,773
315	4,9275	5,047	5,042	5,033	5,009	4,465	3,042
360	4,9275	5,040	5,012	5,086	5,080	4,409	2,874

Mittelung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel **4,990** m/s

Prozentuale Abweichung zum Mittelwert

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	-1,256	0,999	0,438	1,921	1,800	-11,646	-42,407
45	-1,256	-1,105	-0,364	0,277	-0,264	-14,672	-46,254
90	-1,256	-1,225	-0,624	-0,003	-1,065	-20,103	-50,623
135	-1,256	-1,686	-0,965	-0,524	0,298	-10,844	-42,687
180	-1,256	1,239	1,340	1,239	1,440	-1,767	-28,579
225	-1,256	0,859	0,979	0,859	-0,063	-12,688	-40,403
270	-1,256	0,478	0,237	0,538	0,398	-15,774	-44,431
315	-1,256	1,139	1,039	0,859	0,378	-10,524	-39,040
360	-1,256	0,999	0,438	1,921	1,800	-11,646	-42,407
Mittel	1,256	1,081	0,714	0,905	0,834	12,185	41,870

Gemittelte Abweichung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel 0,989 %

Mittelung der Turbulenz

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	0,530	5,149	5,511	3,989	5,321	14,577	29,805
45	0,530	1,062	1,183	2,346	5,552	16,844	30,641
90	0,530	0,751	0,928	2,138	6,162	17,630	31,851
135	0,530	0,740	0,832	1,662	3,906	13,279	28,101
180	0,530	0,760	0,761	1,366	3,076	8,256	23,443
225	0,530	0,737	0,889	1,856	4,879	14,577	27,434
270	0,530	0,786	1,263	2,087	4,966	15,268	29,149
315	0,530	2,602	2,463	2,579	5,704	14,437	29,168
360	0,530	5,149	5,511	3,989	5,321	14,577	29,805

Mittelung der Turbulenz bis einschl. r3

Mittel 1,774 %

Mittelung der Geschwindigkeit

Quelldatei: x30_10ms_vergl.xls

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	9,4855	9,676	9,726	9,755	9,746	8,722	6,042
45	9,4855	9,542	9,571	9,630	9,638	8,387	5,381
90	9,4855	9,505	9,569	9,613	9,572	7,868	4,677
135	9,4855	9,474	9,520	9,567	9,616	8,369	5,427
180	9,4855	9,640	9,649	9,647	9,673	9,088	6,727
225	9,4855	9,618	9,636	9,622	9,578	8,466	6,012
270	9,4855	9,610	9,605	9,624	9,577	8,453	5,807
315	9,4855	9,639	9,693	9,648	9,615	8,642	6,081
360	9,4855	9,676	9,726	9,755	9,746	8,722	6,042

Mittelung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel **9,592** m/s

Prozentuale Abweichung zum Mittelwert

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	-1,108	0,878	1,399	1,701	1,607	-9,068	-37,009
45	-1,108	-0,519	-0,217	0,398	0,481	-12,561	-43,900
90	-1,108	-0,905	-0,238	0,221	-0,207	-17,972	-51,240
135	-1,108	-1,228	-0,749	-0,259	0,252	-12,749	-43,421
180	-1,108	0,502	0,596	0,575	0,846	-5,253	-29,867
225	-1,108	0,273	0,461	0,315	-0,144	-11,737	-37,322
270	-1,108	0,190	0,137	0,336	-0,155	-11,873	-39,459
315	-1,108	0,492	1,055	0,586	0,242	-9,902	-36,602
360	-1,108	0,878	1,399	1,701	1,607	-9,068	-37,009
Mittel	1,108	0,652	0,695	0,677	0,616	11,131	39,536

Gemittelte Abweichung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel 0,783 %

Mittelung der Turbulenz

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	1,225	4,454	5,017	4,798	6,441	14,062	28,578
45	1,225	1,329	1,968	3,189	5,653	15,370	30,392
90	1,225	1,490	2,234	3,396	6,481	17,217	34,911
135	1,225	1,449	2,039	3,094	5,145	14,803	29,093
180	1,225	1,871	2,533	3,621	5,849	11,746	23,991
225	1,225	1,856	2,581	3,840	6,243	15,302	28,012
270	1,225	1,933	2,732	3,940	6,579	14,834	27,884
315	1,225	2,849	3,543	3,888	6,274	14,654	28,599
360	1,225	4,454	5,017	4,798	6,441	14,062	28,578

Mittelung der Turbulenz bis einschl. r3

Mittel 2,637 %

Mittelung der Geschwindigkeit

Quelldatei: x30_15ms.xls

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	15,003	15,386	15,382	15,447	15,248	13,222	10,183
45	15,003	14,997	15,086	15,201	14,987	13,001	9,754
90	15,003	14,979	15,089	15,148	14,878	12,596	9,296
135	15,003	14,927	15,006	15,091	14,950	13,080	9,817
180	15,003	15,321	15,304	15,299	15,268	13,887	11,143
225	15,003	15,324	15,315	15,271	15,048	13,088	10,039
270	15,003	15,264	15,212	15,306	14,920	12,937	10,149
315	15,003	15,340	15,341	15,307	15,106	13,346	10,639
360	15,003	15,386	15,382	15,447	15,248	13,222	10,183

Mittelung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel **15,183** m/s

Prozentuale Abweichung zum Mittelwert

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	-1,185	1,338	1,311	1,739	0,429	-12,915	-32,931
45	-1,185	-1,225	-0,638	0,119	-1,290	-14,371	-35,757
90	-1,185	-1,343	-0,619	-0,230	-2,008	-17,038	-38,773
135	-1,185	-1,686	-1,165	-0,605	-1,534	-13,851	-35,342
180	-1,185	0,909	0,797	0,765	0,560	-8,535	-26,608
225	-1,185	0,929	0,870	0,580	-0,889	-13,798	-33,880
270	-1,185	0,534	0,192	0,811	-1,732	-14,792	-33,155
315	-1,185	1,035	1,041	0,817	-0,507	-12,099	-29,928
360	-1,185	1,338	1,311	1,739	0,429	-12,915	-32,931
Mittel	1,185	1,148	0,883	0,823	1,042	13,368	33,256

Gemittelte Abweichung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel 1,010 %

Mittelung der Turbulenz

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	2,250	5,107	7,176	8,900	12,873	19,525	24,526
45	2,250	3,335	5,223	8,204	12,824	17,829	26,213
90	2,250	3,022	4,920	8,252	12,388	20,061	29,221
135	2,250	2,982	4,778	7,594	11,966	17,856	26,199
180	2,250	3,777	5,401	7,978	11,449	15,912	22,259
225	2,250	3,609	5,575	8,320	12,983	17,790	23,929
270	2,250	3,666	5,710	8,613	12,428	17,663	22,998
315	2,250	4,742	6,121	8,260	12,607	17,171	24,177
360	2,250	5,107	7,176	8,900	12,873	19,525	24,526

Mittelung der Turbulenz bis einschl. r3

Mittel 5,0749 %

Mittelung der Geschwindigkeit nach dem Umbau

Mittelung der Geschwindigkeit

Quelldatei: Umbau_x30_5ms.xls

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	5,026	5,084	5,089	5,046	5,086	4,589	3,256
45	5,026	5,077	5,088	5,115	5,053	4,253	2,725
90	5,026	5,110	5,094	5,120	5,093	4,528	3,050
135	5,026	5,058	5,073	5,101	5,095	4,606	3,240
180	5,026	5,104	5,081	5,082	5,069	4,531	3,132
225	5,026	5,071	5,091	5,082	4,964	4,300	2,912
270	5,026	5,087	5,118	5,116	5,085	4,378	2,801
315	5,026	5,085	5,058	5,089	5,059	4,348	2,920
360	5,026	5,084	5,089	5,046	5,086	4,589	3,256

Mittelung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel **5,071** m/s

Prozentuale Abweichung zum Mittelwert

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	-0,896	0,248	0,346	-0,502	0,287	-9,513	-35,797
45	-0,896	0,110	0,326	0,859	-0,364	-16,138	-46,268
90	-0,896	0,760	0,445	0,957	0,425	-10,716	-39,859
135	-0,896	-0,265	0,031	0,583	0,464	-9,178	-36,113
180	-0,896	0,642	0,188	0,208	-0,048	-10,657	-38,242
225	-0,896	-0,009	0,386	0,208	-2,119	-15,212	-42,580
270	-0,896	0,307	0,918	0,879	0,267	-13,674	-44,769
315	-0,896	0,267	-0,265	0,346	-0,245	-14,265	-42,423
360	-0,896	0,248	0,346	-0,502	0,287	-9,513	-35,797
Mittel	0,896	0,317	0,361	0,560	0,501	12,096	40,206

Gemittelte Abweichung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel 0,534 %

Mittelung der Turbulenz

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	0,513	0,838	1,558	2,671	5,319	13,158	26,149
45	0,513	0,961	2,066	3,861	6,673	16,579	29,890
90	0,513	0,978	1,572	3,014	6,049	13,774	25,675
135	0,513	0,909	1,366	3,162	5,839	12,816	25,228
180	0,513	0,986	1,313	3,320	5,591	12,256	25,160
225	0,513	0,970	1,638	3,139	7,522	15,777	29,220
270	0,513	0,995	1,678	3,374	6,195	14,683	30,382
315	0,513	0,932	1,663	2,930	5,758	15,580	30,442
360	0,513	0,838	1,558	2,671	5,319	13,158	26,149

Mittelung der Turbulenz bis einschl. r3

Mittel 1,544 %

Mittelung der Geschwindigkeit

Quelldatei: Umbau_x30_10ms.xls

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	10,065	10,243	10,239	10,184	10,270	9,480	7,029
45	10,065	10,131	10,160	10,243	10,164	8,957	6,111
90	10,065	10,178	10,162	10,202	10,137	8,966	6,444
135	10,065	10,097	10,129	10,177	10,191	9,376	6,902
180	10,065	10,238	10,235	10,248	10,257	9,467	6,997
225	10,065	10,203	10,241	10,230	10,111	8,560	5,807
270	10,065	10,251	10,297	10,300	10,207	8,874	5,888
315	10,065	10,240	10,224	10,259	10,262	9,426	6,882
360	10,065	10,243	10,239	10,184	10,270	9,480	7,029

Mittelung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel **10,177** m/s

Prozentuale Abweichung zum Mittelwert

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	-1,098	0,651	0,612	0,072	0,917	-6,846	-30,931
45	-1,098	-0,449	-0,164	0,651	-0,125	-11,985	-39,951
90	-1,098	0,013	-0,145	0,248	-0,390	-11,897	-36,679
135	-1,098	-0,783	-0,469	0,003	0,140	-7,868	-32,179
180	-1,098	0,602	0,573	0,700	0,789	-6,974	-31,245
225	-1,098	0,258	0,632	0,524	-0,646	-15,886	-42,938
270	-1,098	0,730	1,182	1,211	0,298	-12,801	-42,142
315	-1,098	0,622	0,465	0,808	0,838	-7,377	-32,375
360	-1,098	0,651	0,612	0,072	0,917	-6,846	-30,931
Mittel	1,098	0,529	0,539	0,477	0,562	9,831	35,486

Gemittelte Abweichung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel 0,661 %

Mittelung der Turbulenz

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	0,913	1,253	1,644	3,233	5,971	11,924	21,997
45	0,913	1,248	2,157	3,902	6,722	14,766	27,462
90	0,913	1,260	2,194	3,639	7,829	14,717	27,308
135	0,913	1,186	1,894	3,742	6,644	11,950	22,659
180	0,913	1,221	1,976	3,407	6,042	11,500	22,908
225	0,913	1,234	1,937	3,782	7,790	16,808	29,265
270	0,913	1,333	2,116	3,984	7,277	15,636	29,329
315	0,913	1,228	2,034	3,182	6,129	12,490	23,301
360	0,913	1,253	1,644	3,233	5,971	11,924	21,997

Mittelung der Turbulenz bis einschl. r3

Mittel 1,9204 %

Mittelung der Geschwindigkeit

Quelldatei: Umbau_x30_15ms.xls

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	15,05	15,339	15,388	15,280	15,231	13,511	10,253
45	15,05	15,120	15,226	15,363	15,104	13,399	9,505
90	15,05	15,157	15,195	15,265	15,166	13,564	9,830
135	15,05	15,074	15,168	15,234	15,245	13,981	10,803
180	15,05	15,295	15,308	15,305	15,304	14,010	10,820
225	15,05	15,311	15,345	15,373	15,048	12,825	9,326
270	15,05	15,387	15,492	15,511	15,228	13,167	9,705
315	15,05	15,348	15,359	15,408	15,378	14,063	10,875
360	15,05	15,339	15,388	15,280	15,231	13,511	10,253

Mittelung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel **15,242** m/s

Prozentuale Abweichung zum Mittelwert

	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	-1,259	0,637	0,959	0,250	-0,071	-11,356	-32,731
45	-1,259	-0,800	-0,104	0,795	-0,905	-12,091	-37,639
90	-1,259	-0,557	-0,308	0,152	-0,498	-11,008	-35,507
135	-1,259	-1,101	-0,485	-0,052	0,020	-8,273	-29,123
180	-1,259	0,348	0,434	0,414	0,408	-8,082	-29,011
225	-1,259	0,453	0,676	0,860	-1,272	-15,857	-38,813
270	-1,259	0,952	1,641	1,766	-0,091	-13,613	-36,327
315	-1,259	0,696	0,768	1,090	0,893	-7,735	-28,651
360	-1,259	0,637	0,959	0,250	-0,071	-11,356	-32,731
Mittel	1,259	0,687	0,704	0,625	0,470	11,041	33,393

Gemittelte Abweichung der Geschwindigkeit bis einschl. r3

Mittel 0,819 %

Mittelung der Turbulenz

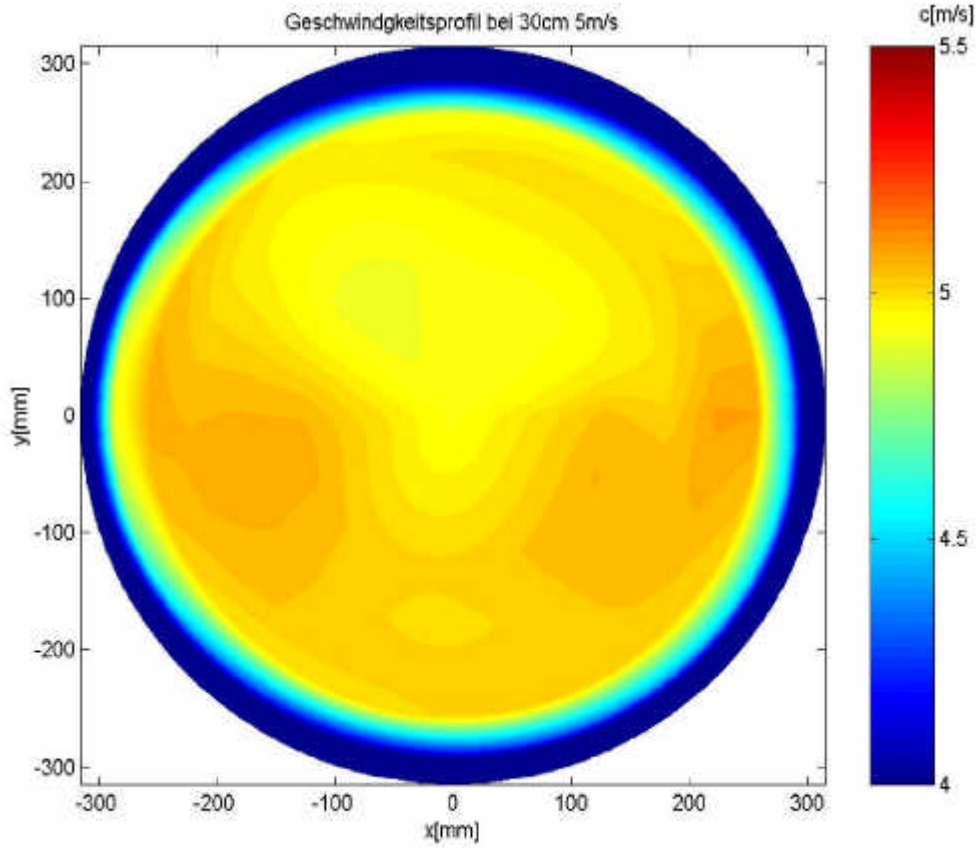
	r0=0	r1=128,6	r2=181,9	r3=222,7	r4=257,2	r5=287,6	r6=315
0	1,629	2,816	4,069	7,031	11,110	17,310	25,510
45	1,629	2,361	3,808	6,559	10,354	16,083	27,319
90	1,629	2,245	3,821	6,662	10,785	16,907	27,287
135	1,629	2,320	3,652	6,355	10,005	14,317	24,124
180	1,629	2,833	4,375	7,276	11,047	14,884	23,838
225	1,629	3,030	4,674	7,215	11,237	18,550	28,392
270	1,629	3,108	4,852	7,114	11,257	18,131	27,904
315	1,629	2,910	4,579	7,280	10,726	15,730	24,124
360	1,629	2,816	4,069	7,031	11,110	17,310	25,510

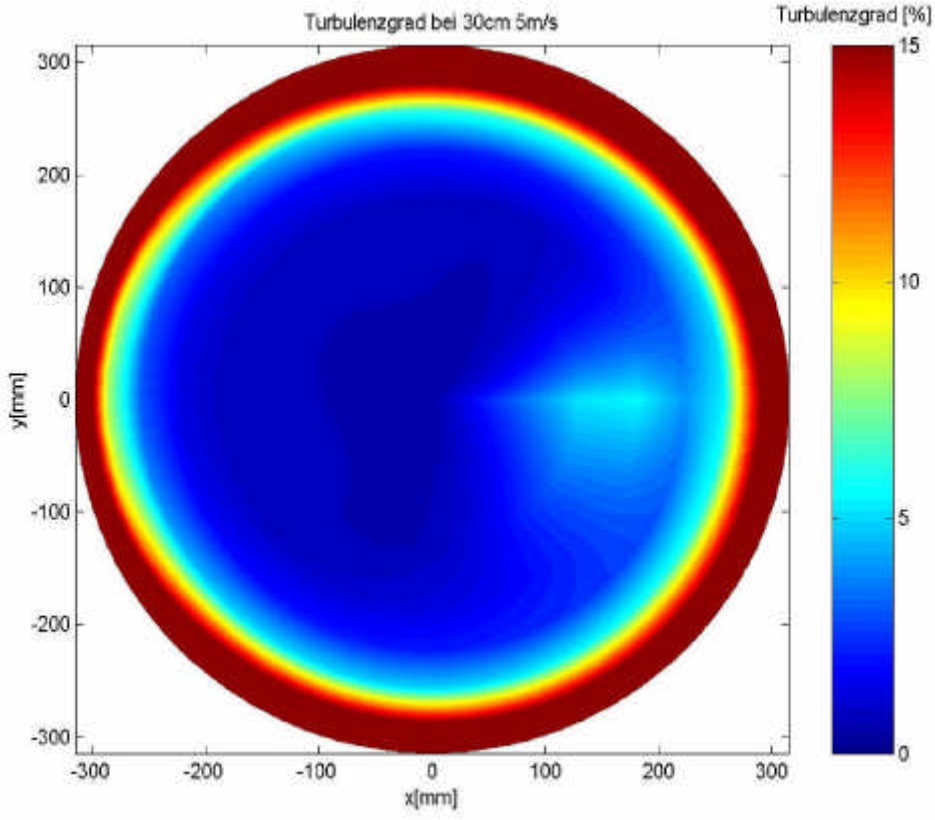
Mittelung der Turbulenz bis einschl. r3

Mittel 3,876 %

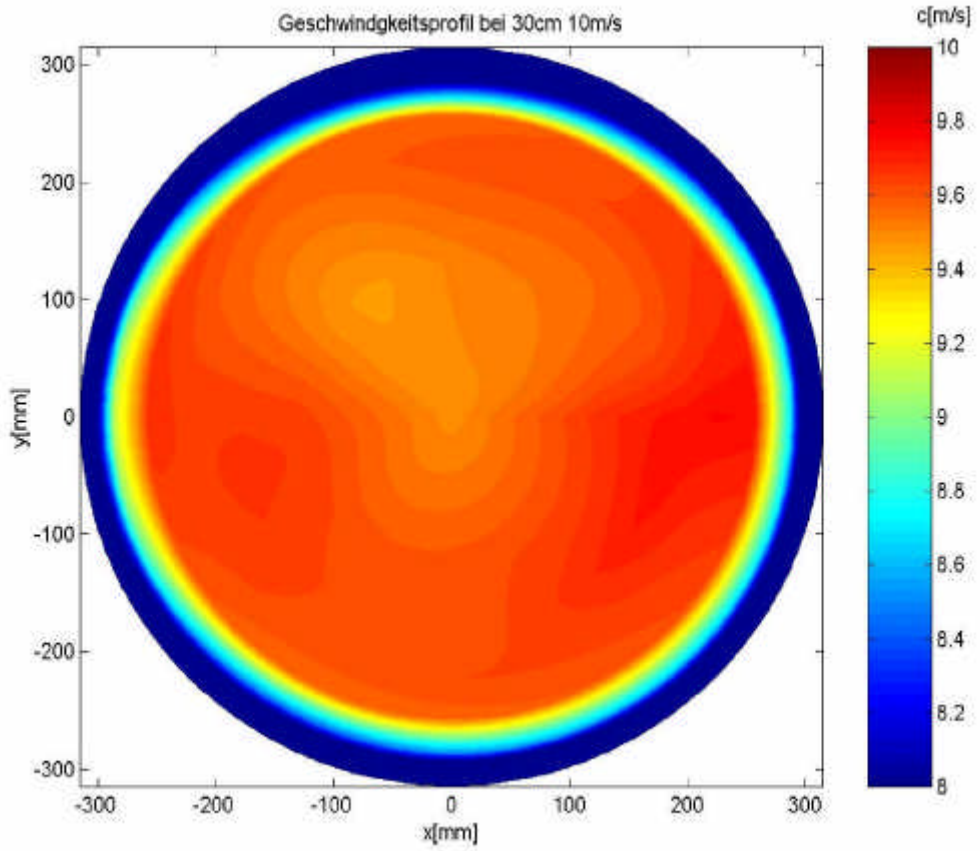
Dreidimensionale Darstellungen der Geschwindigkeit und der Turbulenz

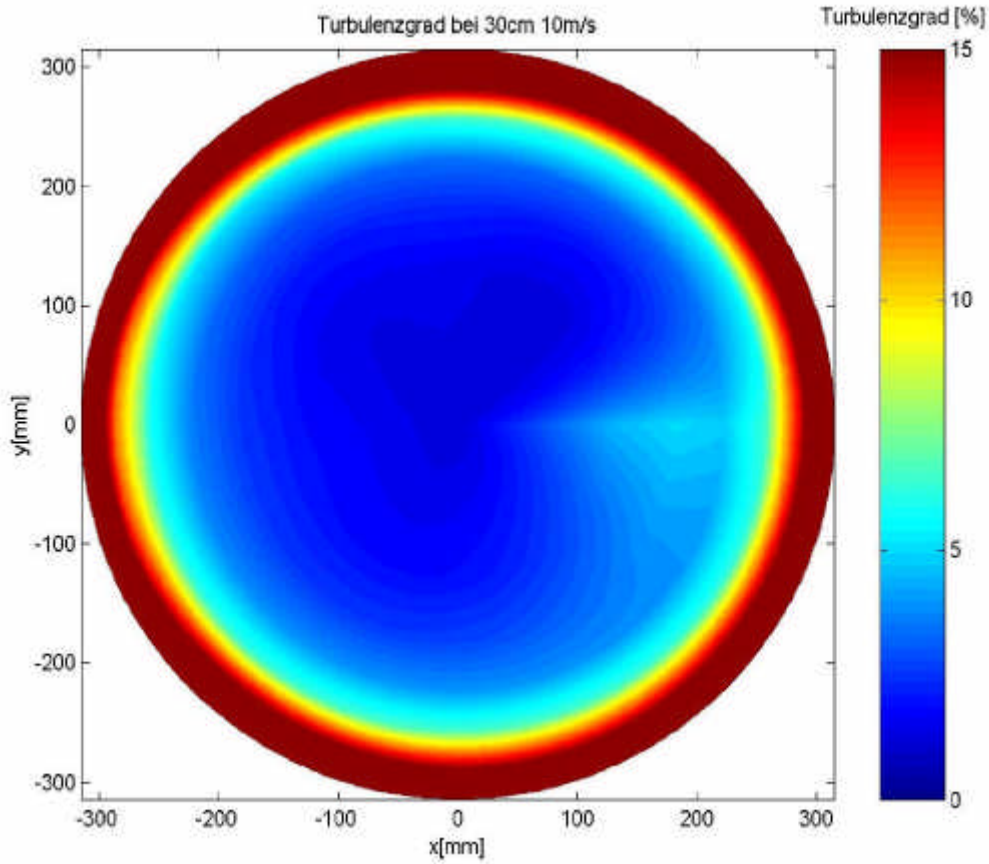
Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad vor dem Umbau bei 5m/s 30cm



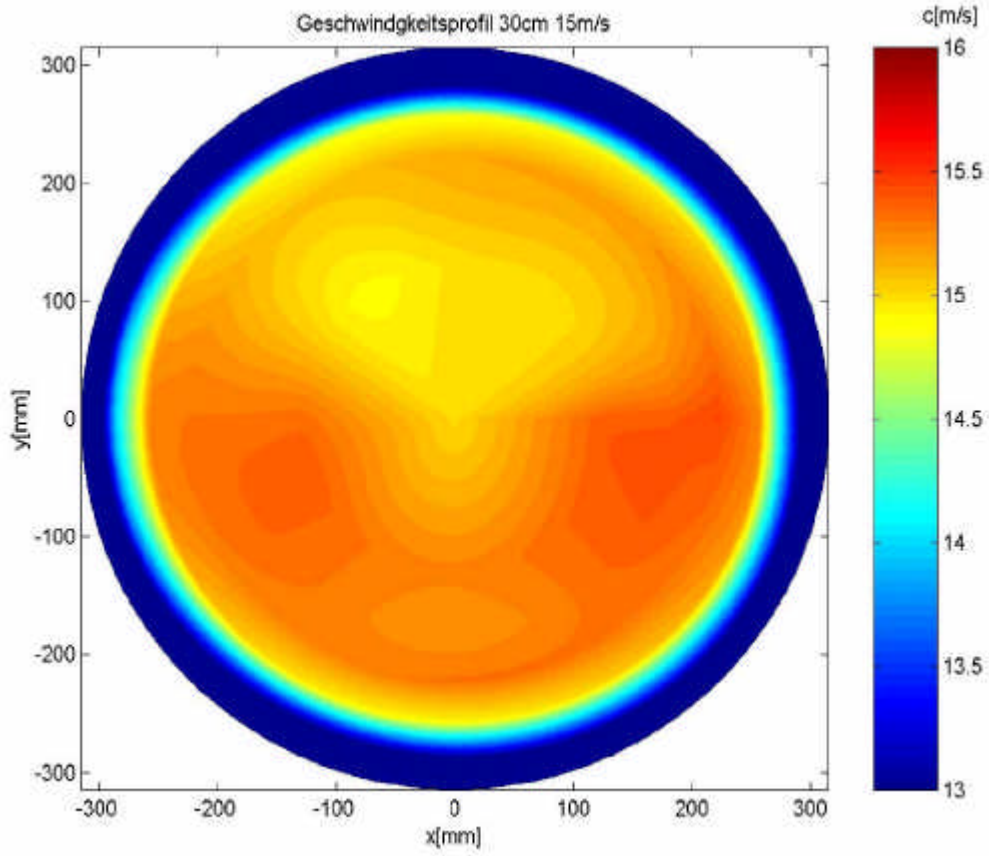


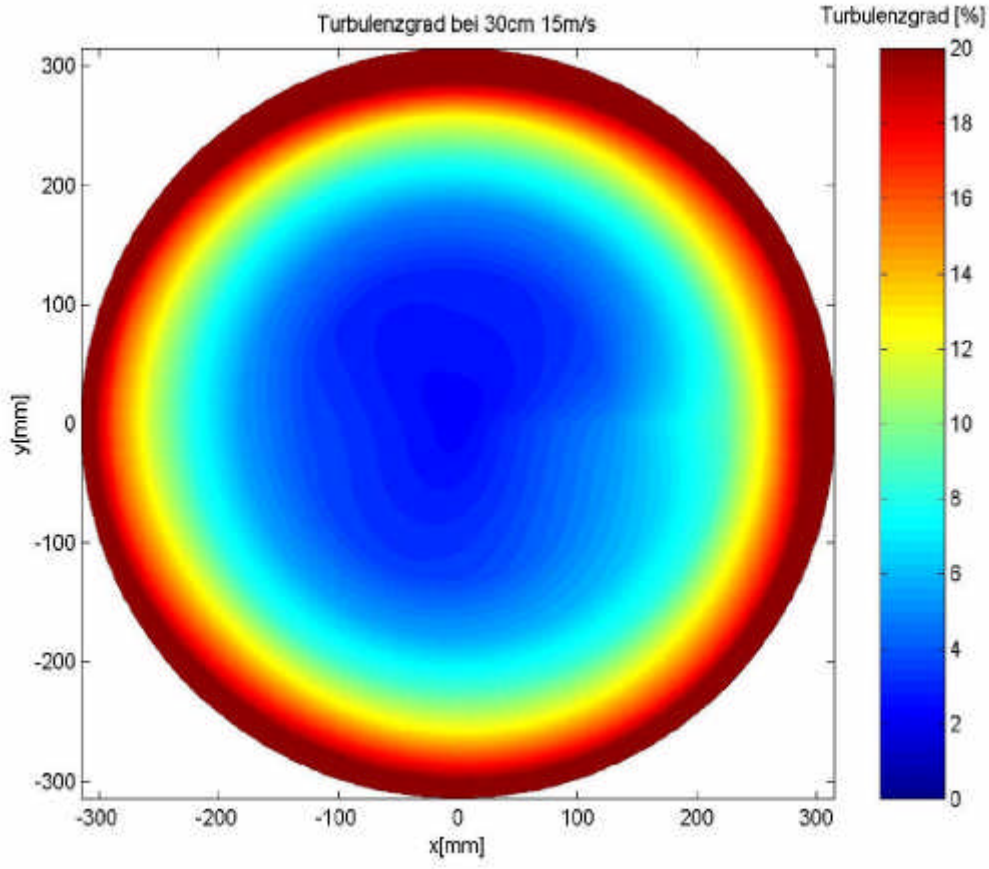
Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad vor dem Umbau bei 10m/s 30cm



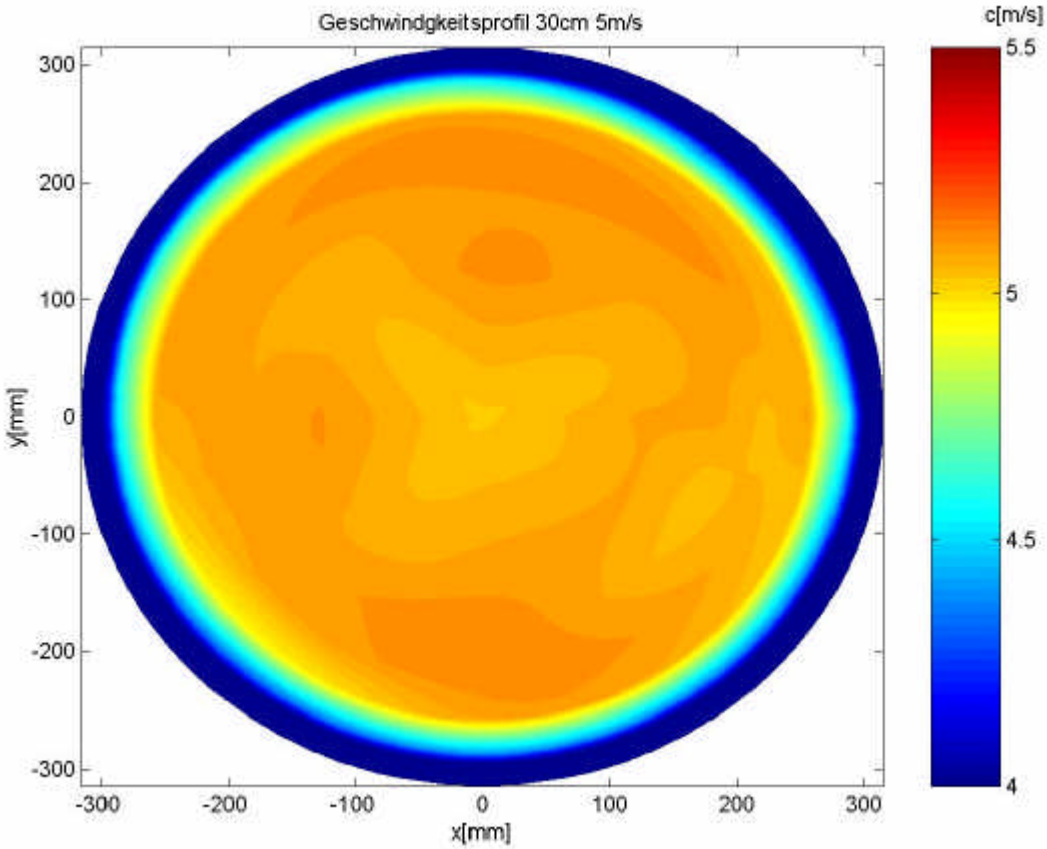


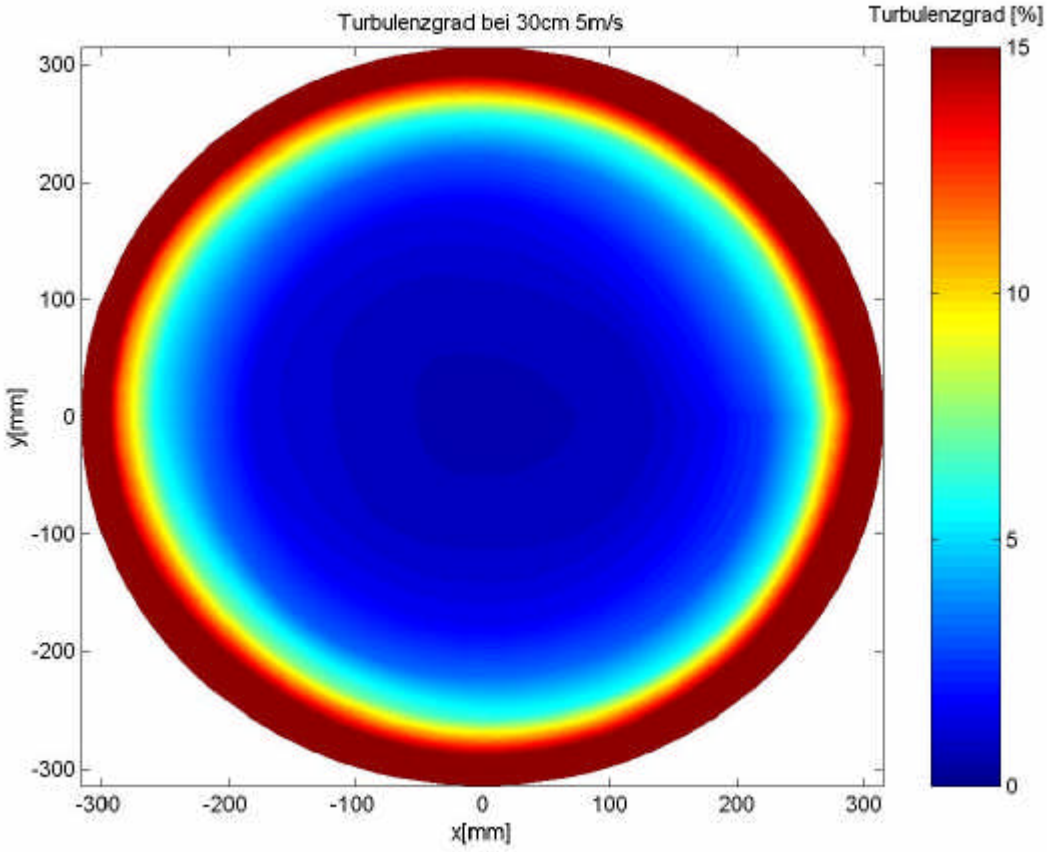
Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad vor dem Umbau bei 15m/s 30cm



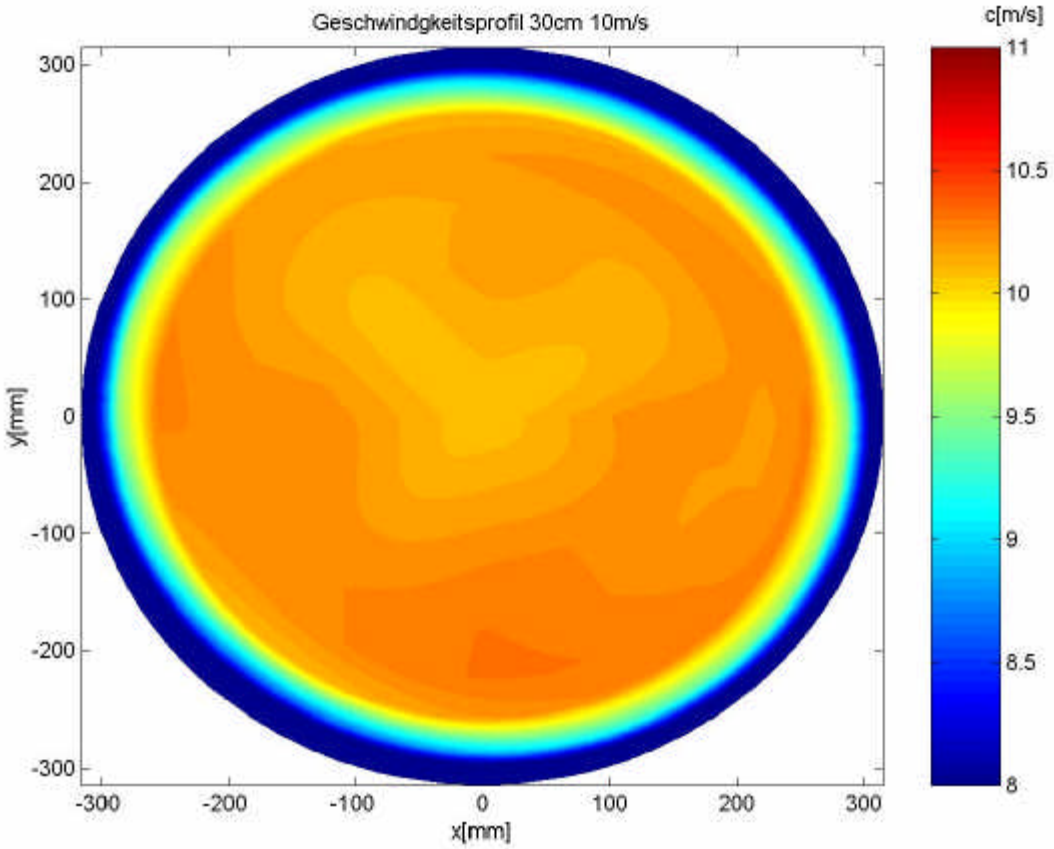


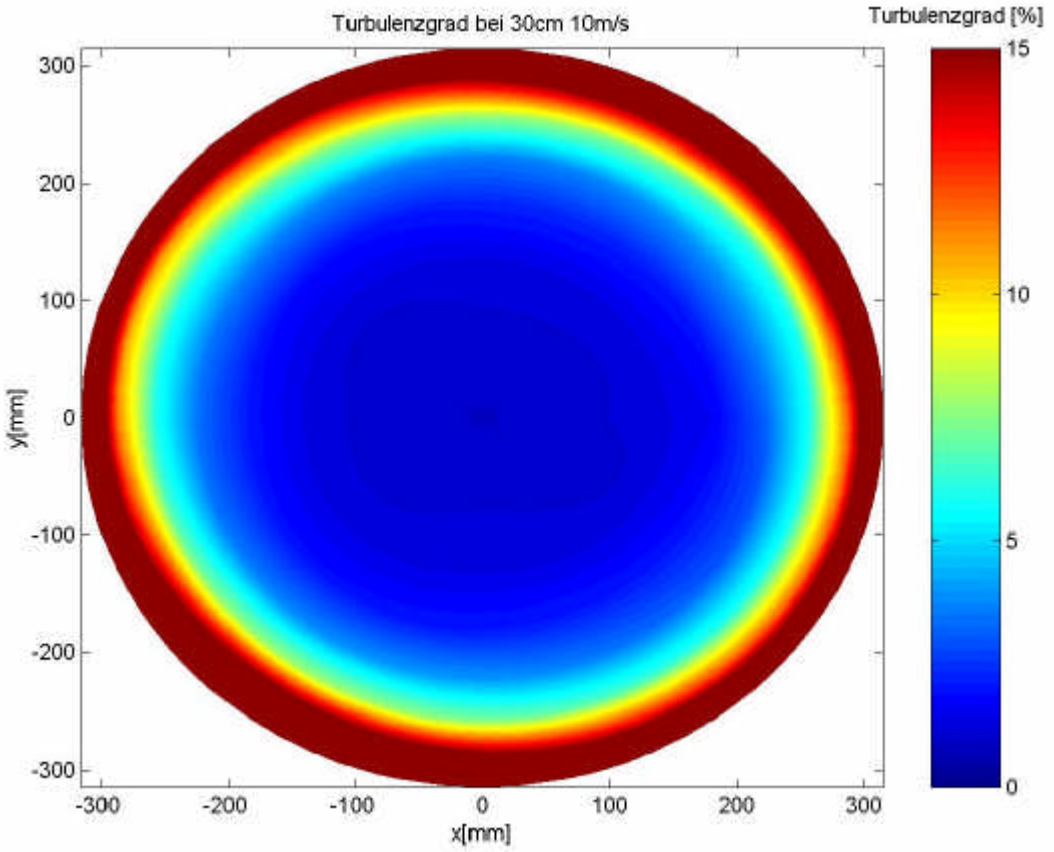
Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad nach dem Umbau bei 5m/s 30cm



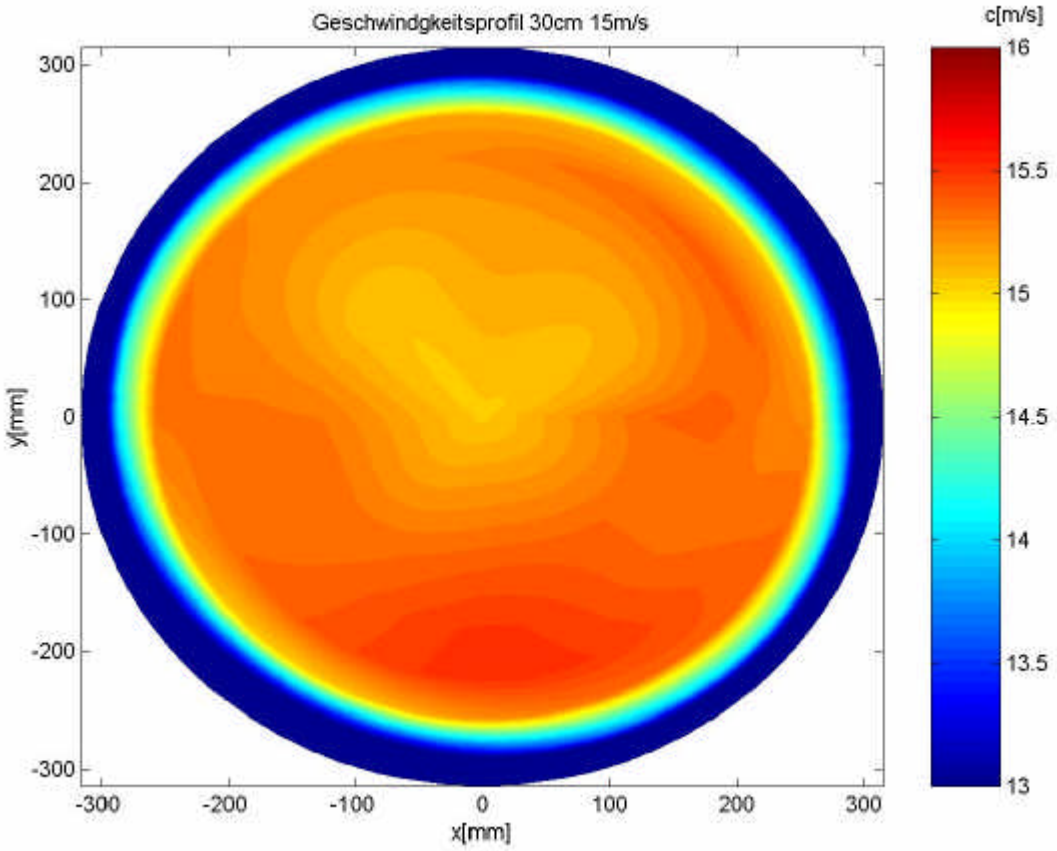


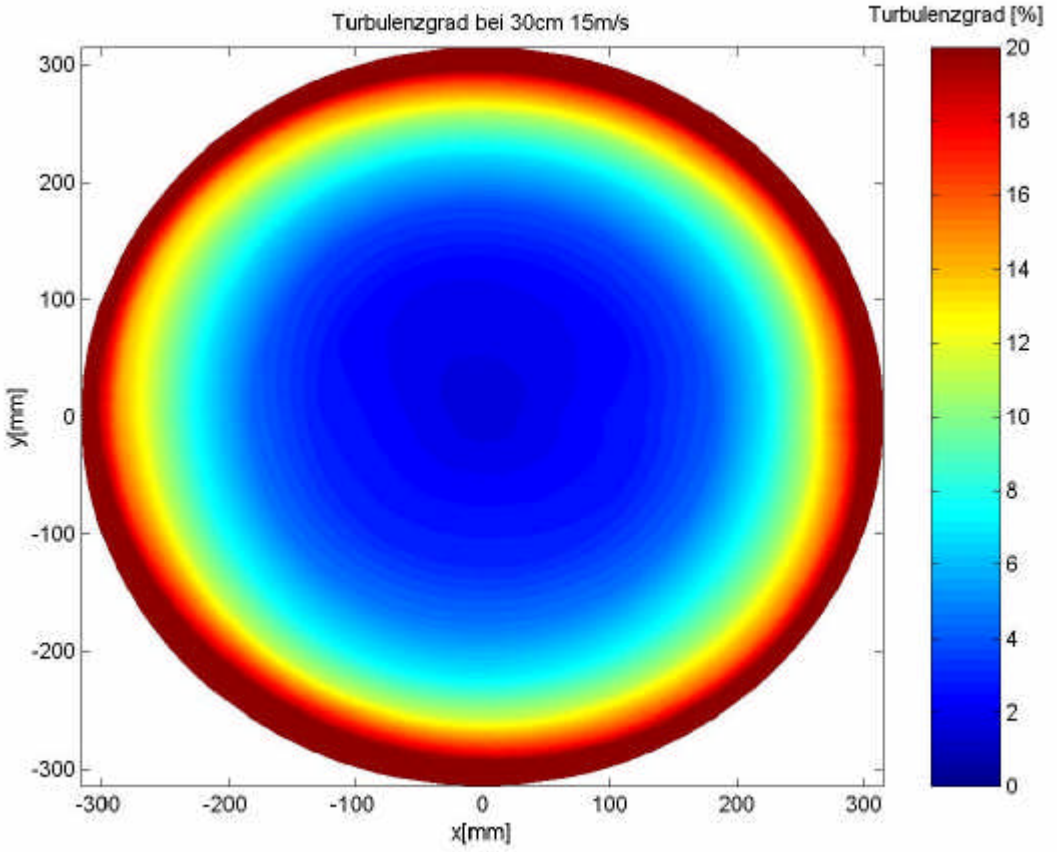
Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad nach dem Umbau bei 10m/s 30cm





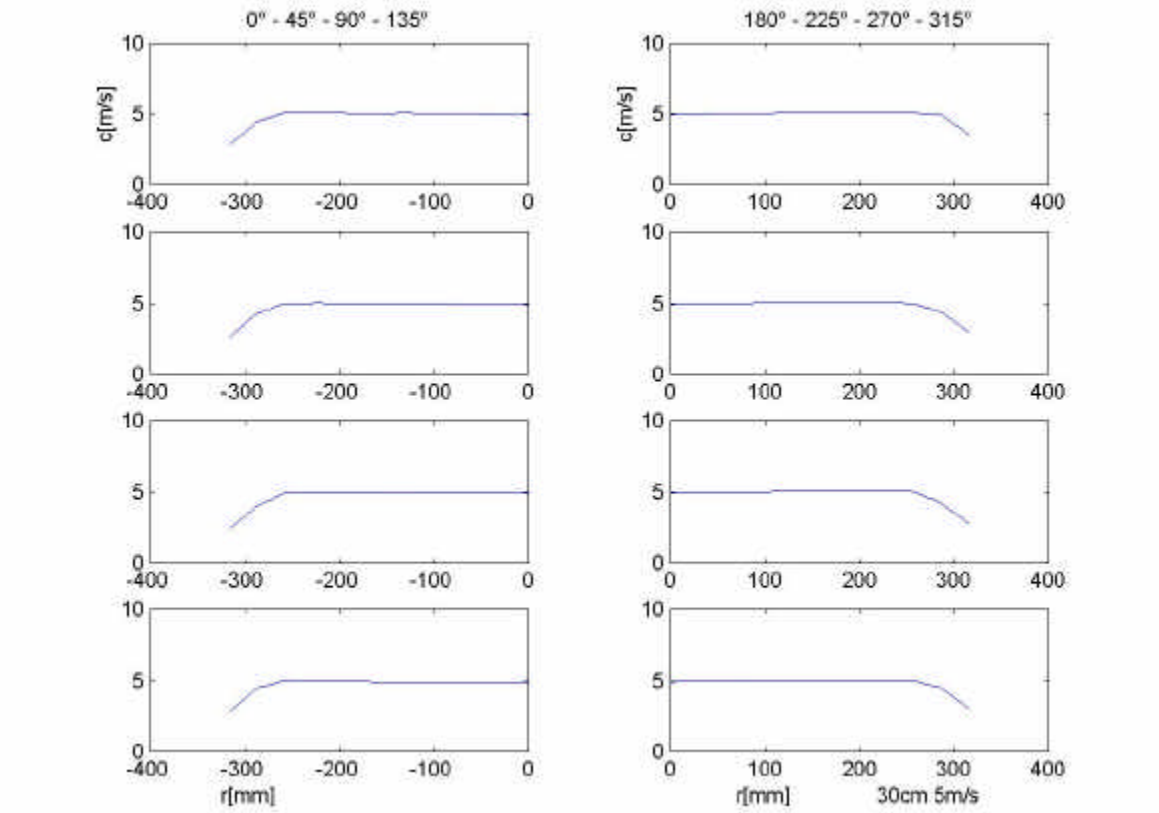
Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad nach dem Umbau bei 15m/s 30cm

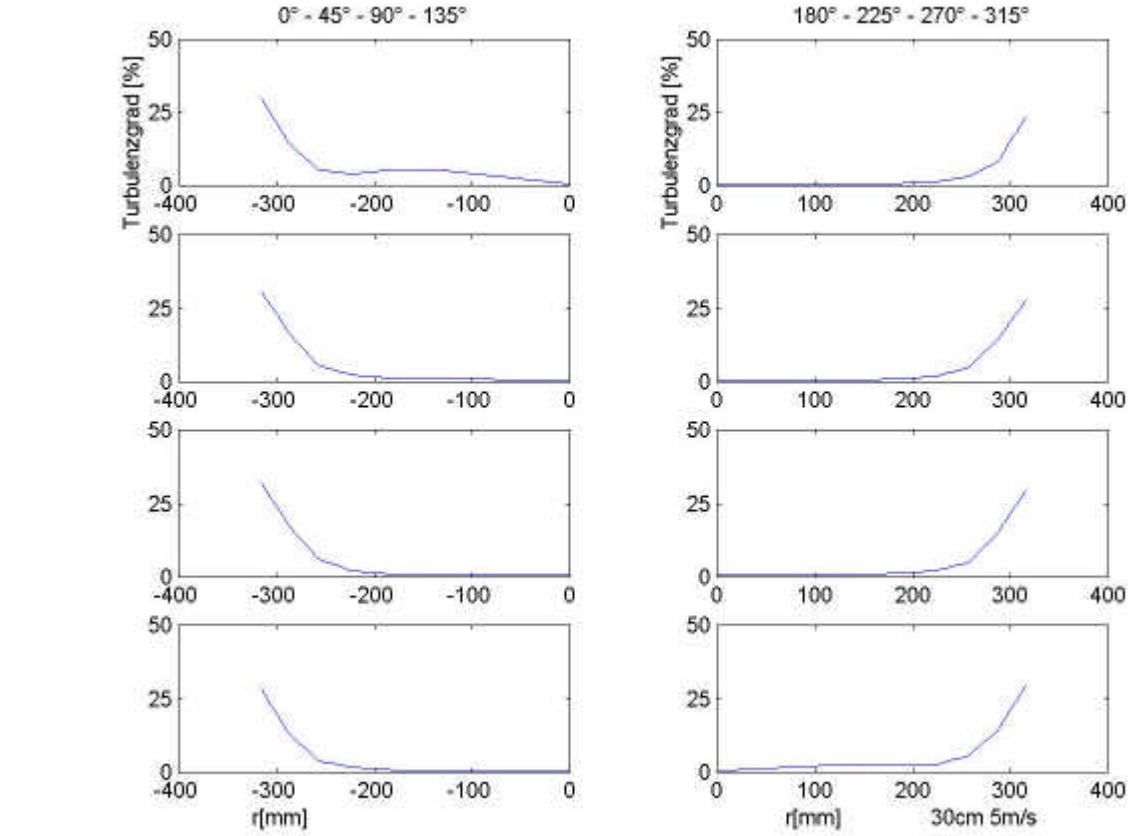




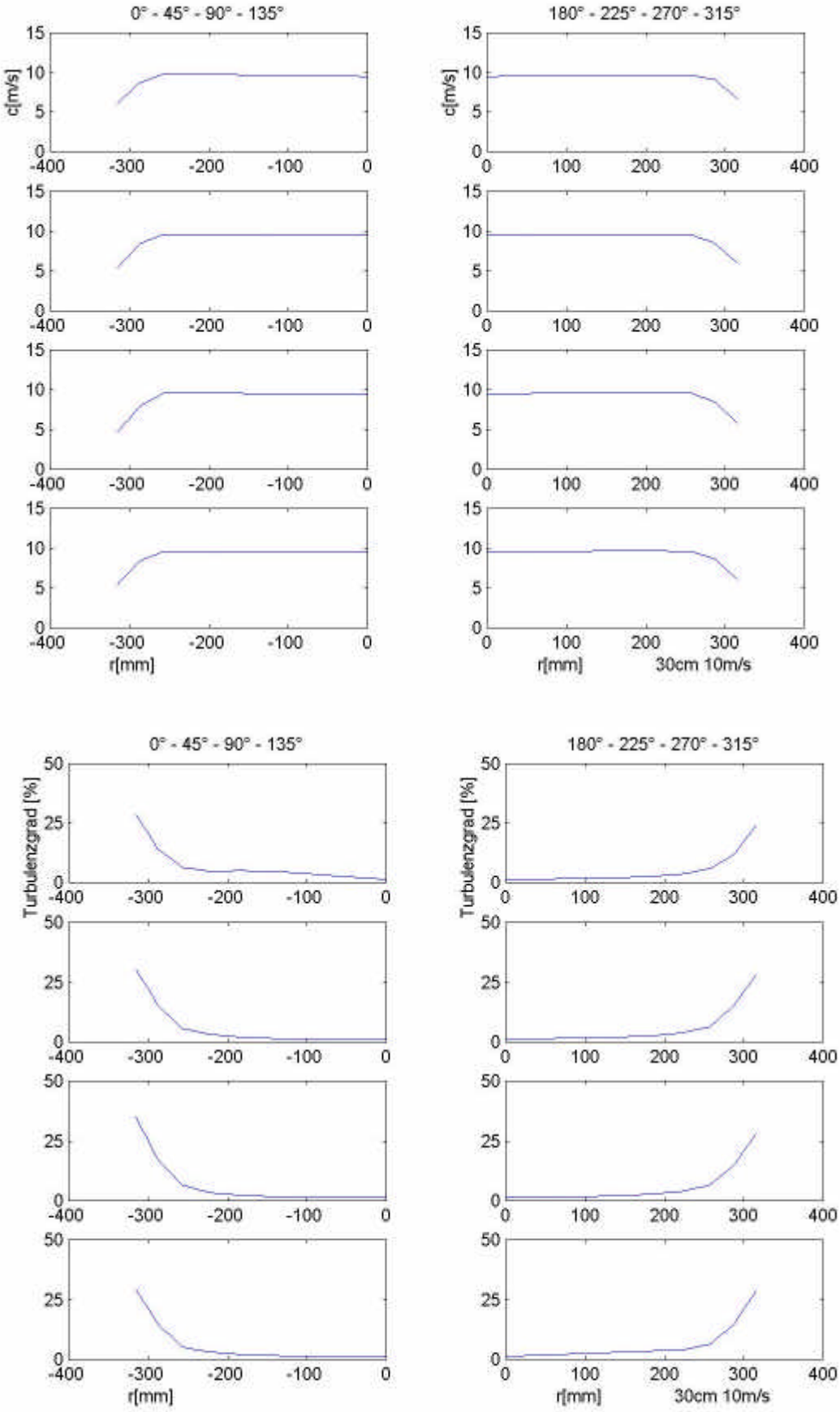
Zweidimensionale Darstellungen der Geschwindigkeit und der Turbulenz

Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad vor dem Umbau bei 5m/s 30cm

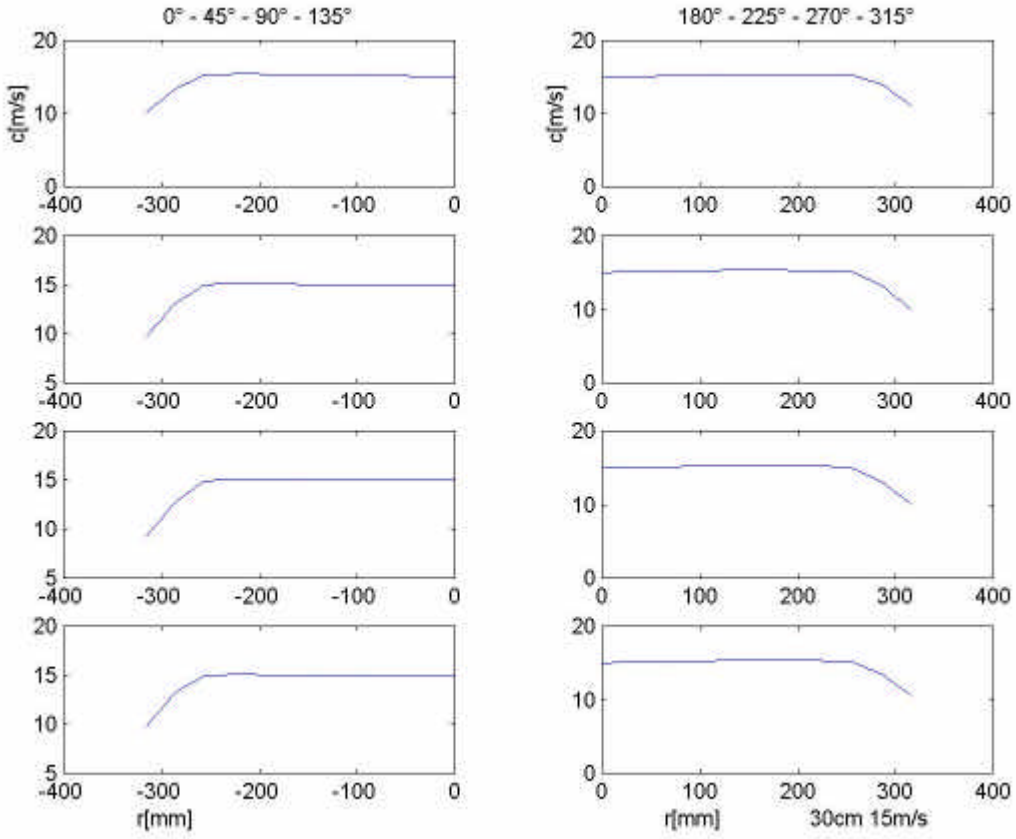


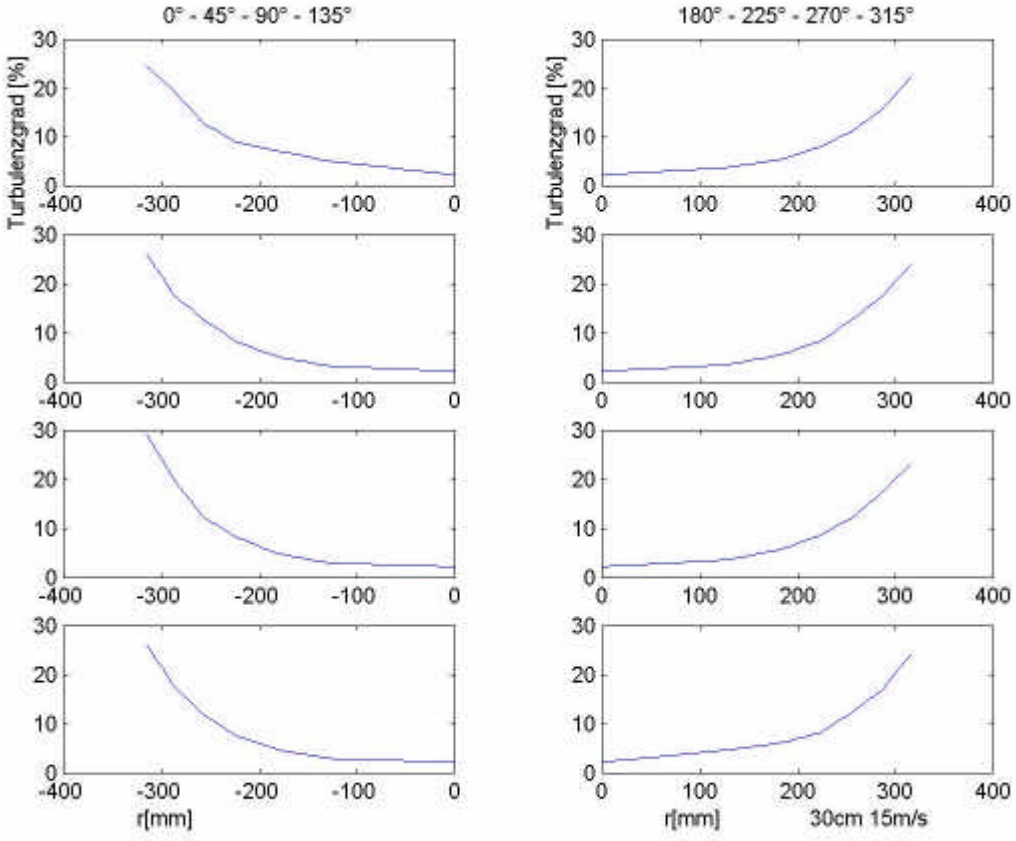


Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad vor dem Umbau bei 10m/s 30cm

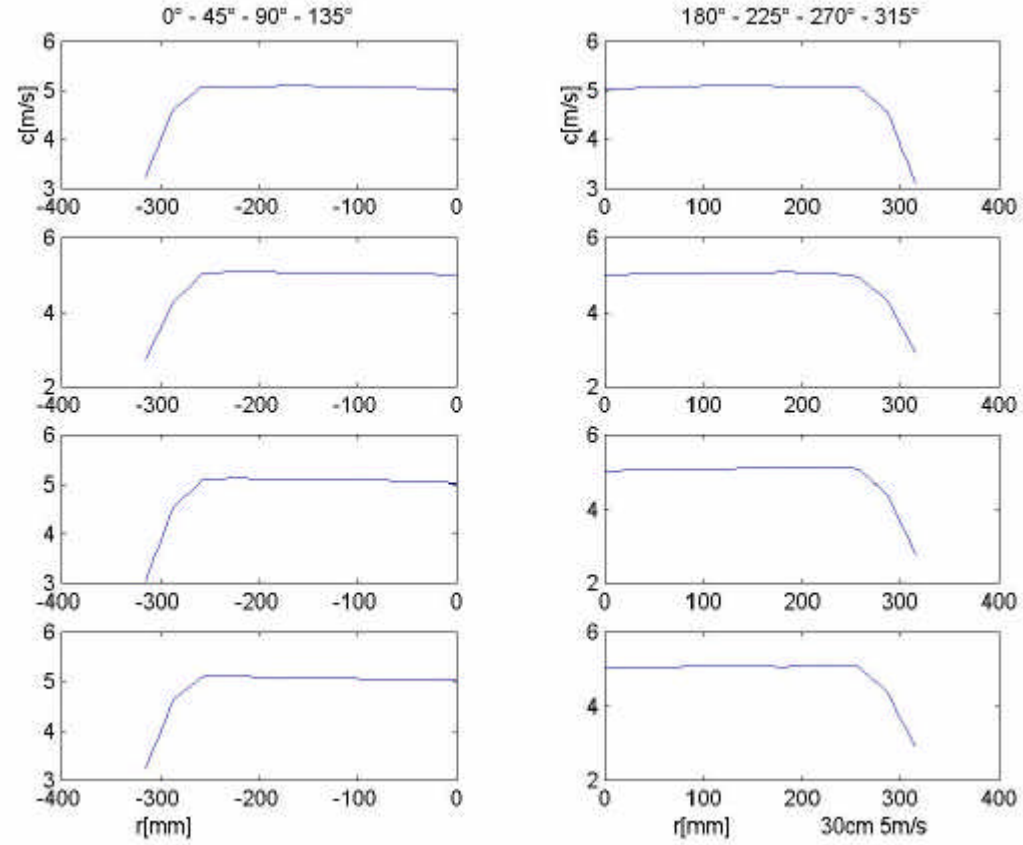


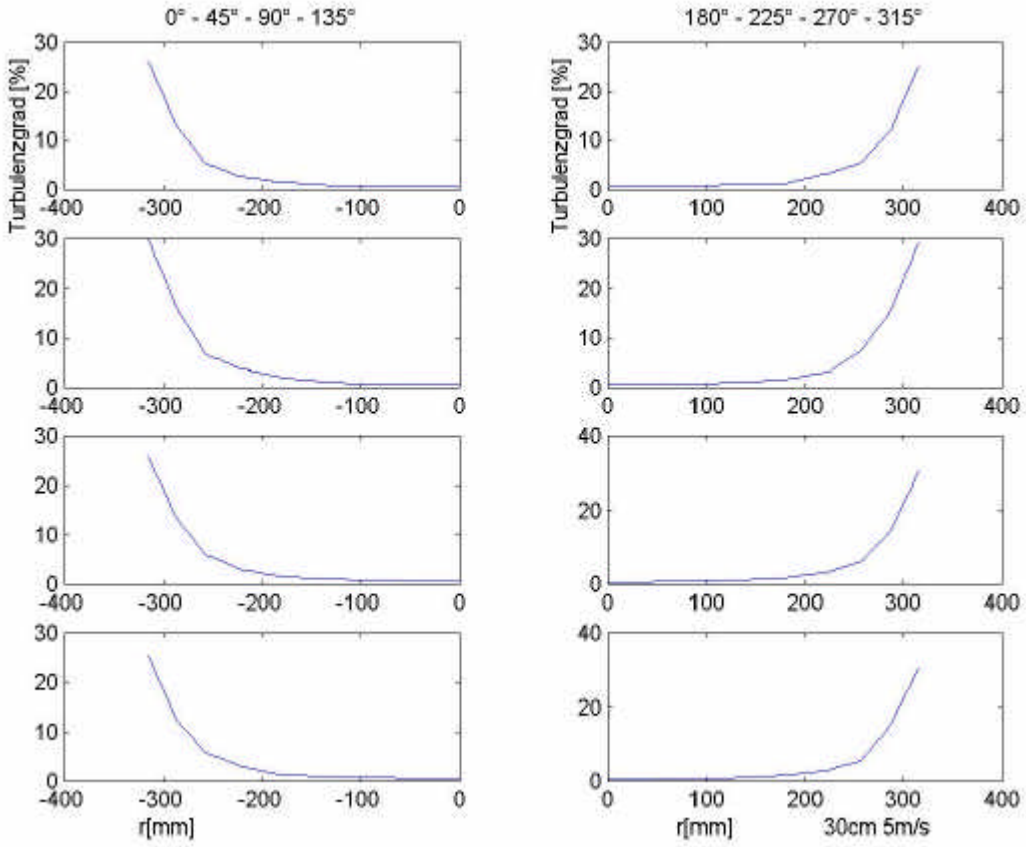
Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad vor dem Umbau bei 15m/s 30cm



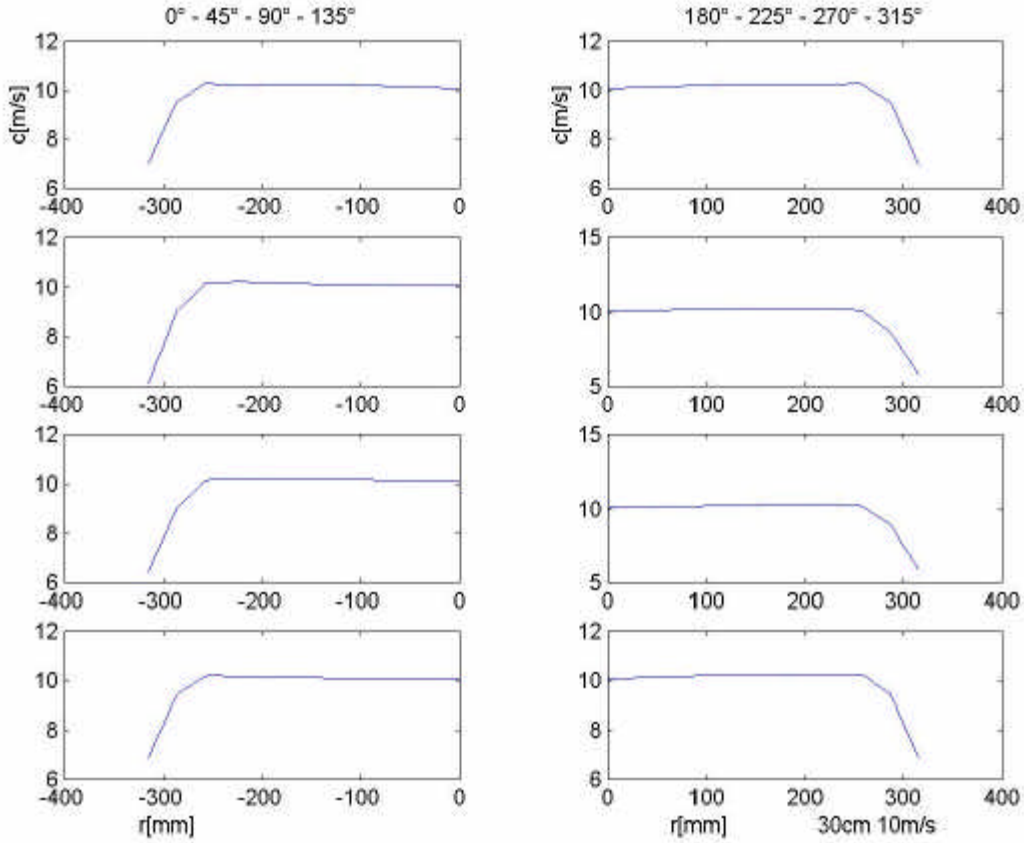


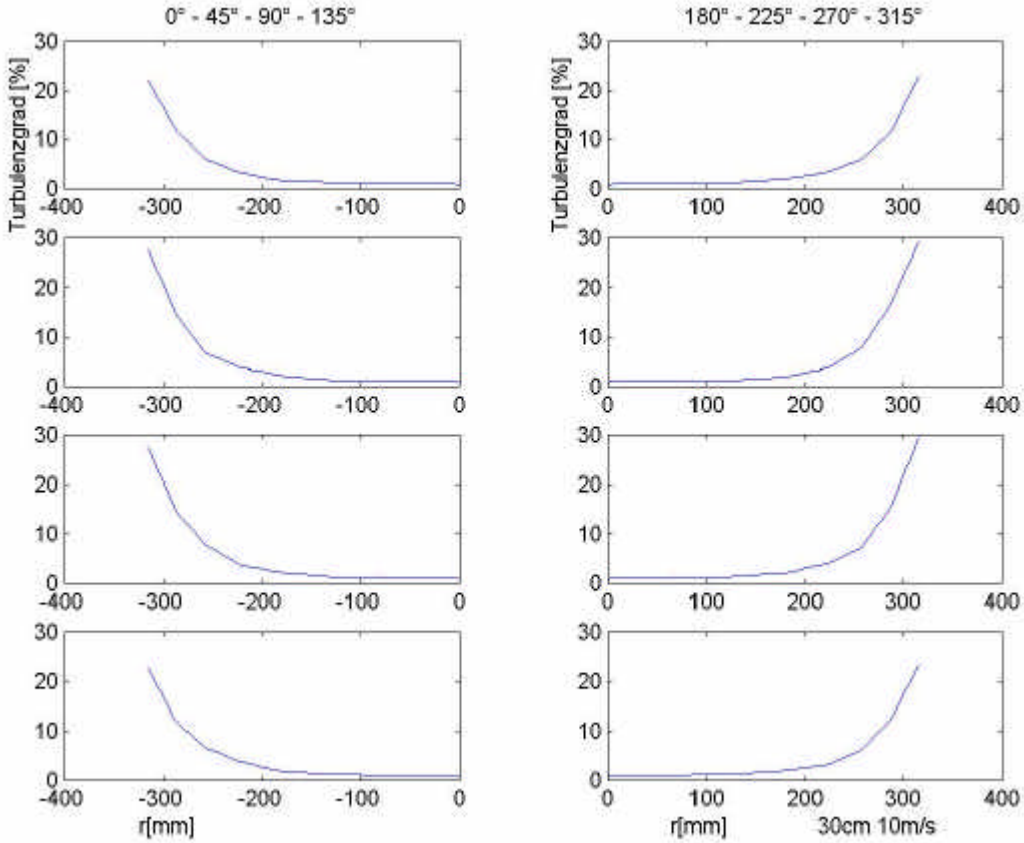
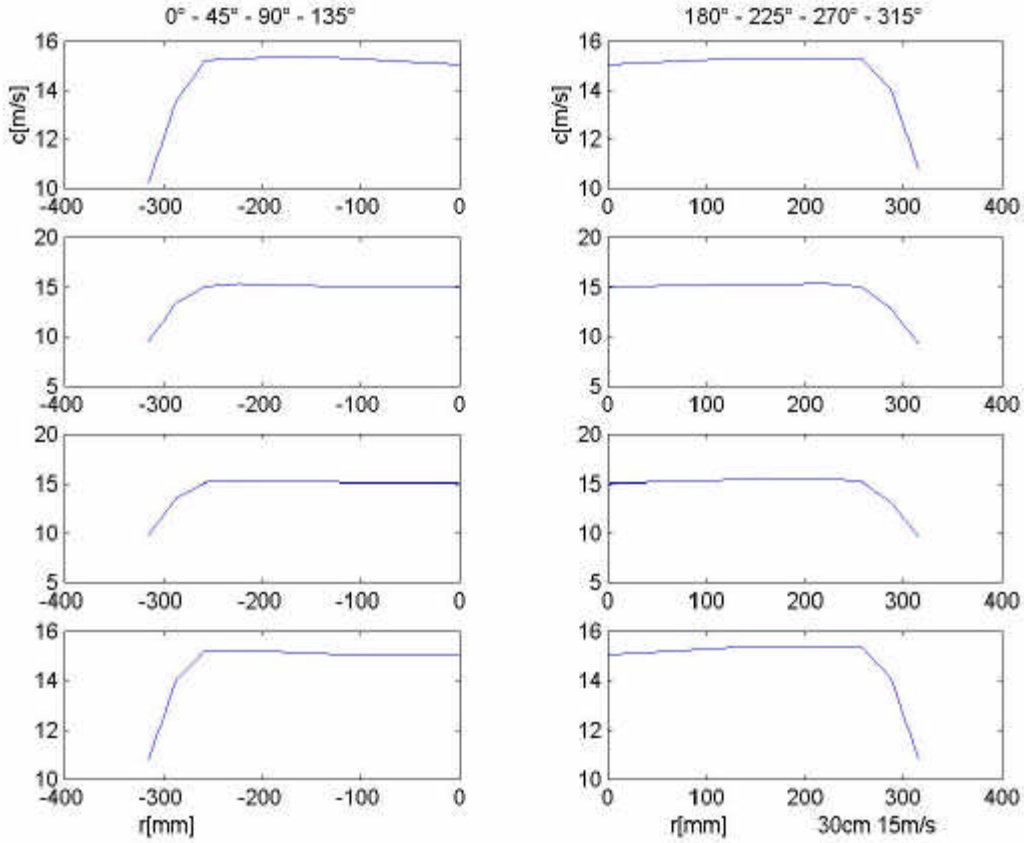
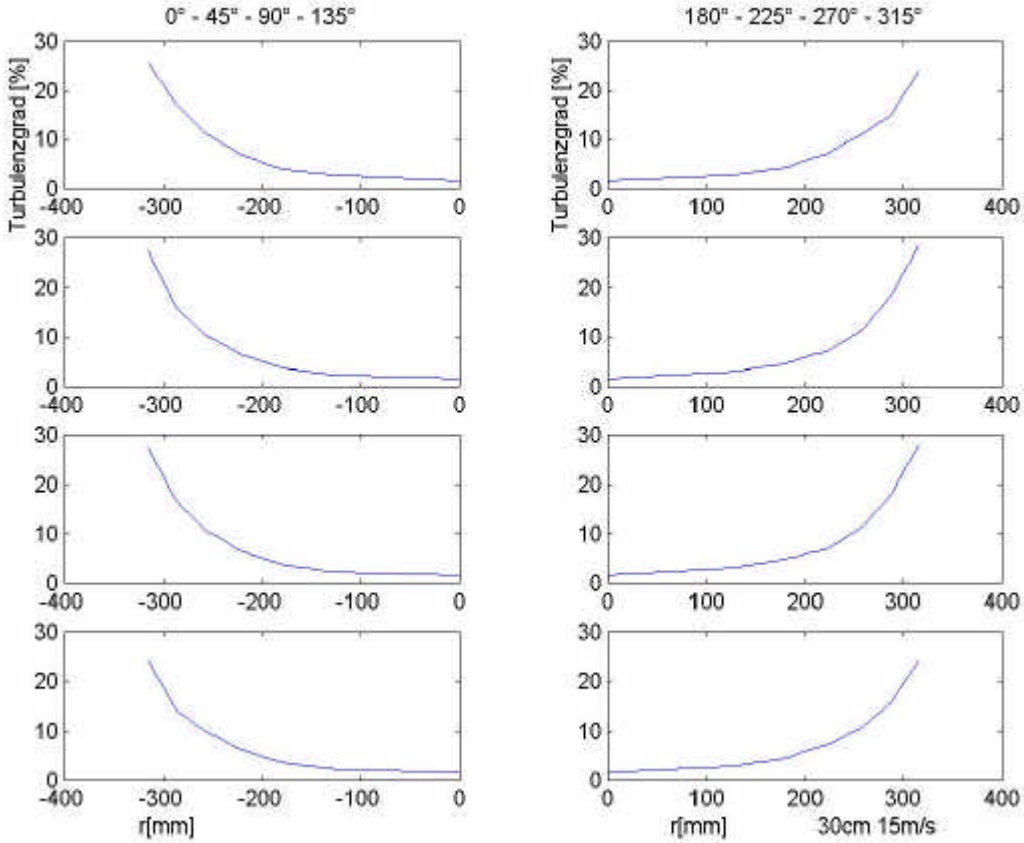
Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad nach dem Umbau bei 5m/s 30cm





Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad nach dem Umbau bei 10m/s 30cm





Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzgrad nach dem Umbau bei 15m/s 30cm