

# Turbulenzeinflüsse bei der Messung der Windgeschwindigkeit

Olga Deiss\*, Frank Lackmann\*,  
Christoph Hilling\*\*, Frank Kameier\*

\*Fachhochschule Düsseldorf, Labor für Strömungsmaschinen,  
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Josef-Gockeln-Str. 9, 40474 Düsseldorf, <http://ifs.muw.fh-duesseldorf.de/>

\*\*WINDTEST Grevenbroich GmbH, Frimmersdorfer Str.73, 41517 Grevenbroich, <http://www.windtest.de/>

## Einleitung

Um eine möglichst kurze Amortisationszeit für Windenergieanlagen realisieren zu können, ist die Wahl des Standortes und die Leistungskurve einer Anlage von größter Bedeutung. Hierzu werden Standortgutachten und Leistungskurven vorgelegt. Zur Erstellung dieser Gutachten wird eine genaue Bestimmung der Windgeschwindigkeit benötigt. Die Messung der Windgeschwindigkeit erfolgt üblicherweise mit sogenannten Schalenkreuzanemometern, aber auch Ultraschallanemometer werden seit kurzem zur Geschwindigkeitsmessung benutzt.

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

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

Im Rahmen einer Diplomarbeit [1] wurden Anemometer unterschiedlicher Hersteller im Windkanal der FH Düsseldorf kalibriert. Dabei wurden die Anemometer bei einer turbulenten und einer schrägen Anströmung miteinander verglichen. Die Untersuchung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma WINDTEST Grevenbroich GmbH, die einen Teil der untersuchten Anemometer zur Verfügung stellte. Auch die Firma ENRON WIND Deutschland, das Fachgebiet Umwelttechnik der FH Düsseldorf sowie die Universität Bielefeld stellten Anemometer zur Verfügung.

## 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 Nabenhöhe der Windenergieanlage installiert. Das Schalenkreuzanemometer ist ein sogenannter Widerstandsläufer, es hat eine senkrechte Achse und drei oder vier Schalen, die den Wind aufnehmen. Eine mögliche Windfahne dient zur Detektion der Windrichtung (Bild 1).



**Bild 1:** Schalenkreuzanemometer und Windfahne [2].

Die Halbkugeln drehen sich im Luftstrom mit der Umfangsgeschwindigkeit  $u$  um die senkrechte Achse. Der Antrieb erklärt sich aus den unterschiedlichen Widerstandsbeiwerten  $c_w$  der Halbkugelschalen. Die konvexe Seite der Schale hat einen geringeren  $c_w$ -Wert, als die konkave Seite. Die Schale mit der konkaven Seite wird daher vom Wind weg bewegt. Zur Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit wird meistens die Drehzahl als Frequenz gemessen. Zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der Drehzahl besteht ein linearer Zusammenhang, der durch eine Kalibrierung ermittelt wird. Der Widerstandsbeiwert  $c_w$  ist von der Reynolds-Zahl abhängig. Deshalb ist bei einem größeren Geschwindigkeitsbereich eine individuelle Kalibrierung erforderlich [3].

Das Schalenkreuzanemometer läuft schon bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 0,3 m/s an, flaut der Wind abrupt ab, läuft es wegen der Trägheit noch eine Zeit nach. Die Geschwindigkeit wird für einige Sekunden gemessen, obwohl bereits ein geringerer Wind 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 auf nur drei Halbschalen, so dass sich das Trägheitsmoment verringert. Um die Anlaufgeschwindigkeit klein zu halten, wählt man den Schalendurchmesser möglichst groß.

#### Positive Merkmale:

- robuster Windgeschwindigkeitsmesser,
- wartungsarm, hohe Lebensdauer von ca. 20 Jahren (Lageraustausch je nach Einsatz alle 3 bis 6 Jahre) [2],
- richtungsunempfindlich in der Ebene des Schalenkreuzes.

#### Negative Merkmale:

- reibungsabhängige Anlaufgeschwindigkeit,
- Linearitätsabweichung wegen der Reynoldsabhängigkeit des Widerstandsbeiwertes  $c_w$ ,
- mäßige Genauigkeit von ca. 1 % [4],
- kurze Kalibrierintervalle von 2 bis 3 Jahren.

### Ultraschallanemometer

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 ausgestrahlt. Da sich die Auflösung mit der Schallfrequenz erhöht, arbeiten die akustischen Strömungsmesser im Ultraschallbereich [5]. Akustische Strömungsmesser sind zuverlässige Messmittel in der Meteorologie und werden zur Untersuchung atmosphärischer Turbulenzen eingesetzt. Sie werden zur Strömungs- und Durchflussmessung in Flüssigkeiten (als climb-on-Verfahren auf Rohrleitungen) und Gasen verwendet [6], sofern es auf eine hohe Datenqualität ankommt oder die Zuverlässigkeit und Wartungsfreiheit der Messsysteme von Bedeutung ist [7]. Ultraschallanemometer erfassen Luftströmungen in ein, zwei oder drei Dimensionen. Zu dem physikalischen



Bild 2: Ultraschallanemometer, Firma METEK [9].

Grundprinzip gehört der Mitführungseffekt. Zur Schallgeschwindigkeit in ruhender Luft  $a$  überlagert sich die Geschwindigkeitskomponente einer Luftbewegung in Windrichtung  $c$ . So gilt in Strömungsrichtung  $a+c$  und gegen die Strömungsrichtung  $a-c$ . Auch die Richtung des Schallstrahles ändert sich mit der Richtung der Luftbewegung [3]. Die aus der Überlagerung resultierende Ausbreitungsgeschwindigkeit führt zu unterschiedlichen Laufzeiten des Schalles bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Richtungen über eine feststehende Messstrecke.

Die vorliegende Untersuchung wurde mit einem Sonic Anemometer-Thermometer (eine Kombination aus Geschwindigkeits- und Temperaturmessgerät) durchgeführt (Bild 2). Dieses Anemometer arbeitet nach dem Laufzeitdifferenzverfahren. Zwei sich gegenüber liegende Sensoren, die ein Signal sowohl senden als auch empfangen, senden einander abwechselnd einen Impulszug im Ultraschallbereich mit einer Frequenz von ca. 180 kHz zu. Durch die Verwendung von mehreren Wandlerpaaren können die einzelnen Strömungskomponenten in Betrag und Richtung der Luftströmung ermittelt werden. Die Berechnung des Turbulenzgrades erfolgt aus der Standardabweichung  $s$  der Messwerte.

Ultraschallanemometer kommen ohne bewegte Teile aus. Die Anlaufschwellen und Trägheitsfehler sind daher nicht vorhanden. Durch den Wegfall von Verschleißteilen sind periodische Wartungsintervalle nicht erforderlich. Die Signalqualität bleibt über die gesamte Lebensdauer erhalten, da Lagerreibung und Verschmutzung, im Gegensatz zu den Halbschalenanemometern, keine Rolle spielen [6].

#### Positive Merkmale:

- keine bewegten Teile, geringer Verschleiß,
- großer Messbereich bei hoher Auflösung,

- die Messergebnisse sind unabhängig von Temperatur, Dichte und Druck,
- vektorielle Geschwindigkeitsmessung mit drei Komponenten möglich,
- korrosionsbeständig, hohe Lebensdauer und Zuverlässigkeit,
- kurze Messzeiten möglich (1 bis 10  $\mu$ s je Messwert), d.h., schnelle Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit nach Richtung und Betrag messbar,
- gleichzeitig Temperatur- und Schallgeschwindigkeitsmessung.

**Negative Merkmale:**

- hoher Preis gegenüber mechanischen Wandlern,
- relativ hoher Aufwand für Genauigkeiten von  $\pm 1\%$  vom Messwert [3].

**Windgeschwindigkeitsprofil**

Die Strömungsgeschwindigkeit wird an der Erdoberfläche abgebremst und es entsteht eine bodennahe Grenzschicht mit einer charakteristischen vertikalen Verteilung der Windgeschwindigkeit von null bis zu der des geostrophischen Windes (Bild 3). Der Wind, der in Bodennähe auftritt und von Windenergieanlagen genutzt wird, ist turbulent. Die Windenergieanlagen arbeiten immer in dieser turbulenten Grenzschicht. Deshalb ist es wichtig, dass die Anemometer die Geschwindigkeit einer turbulenten Strömung richtig messen.

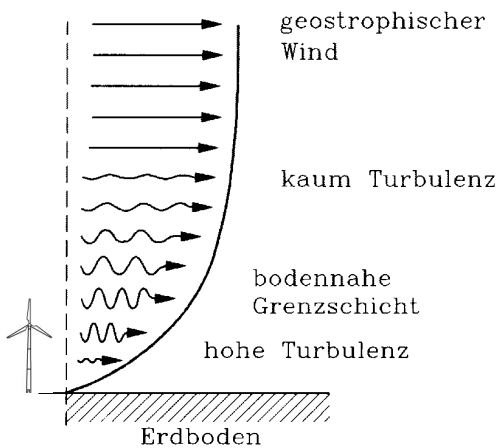
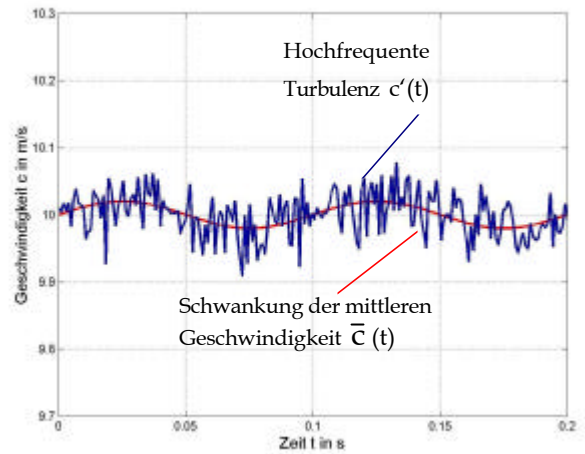


Bild 3: Bodennahe Grenzschicht [9].

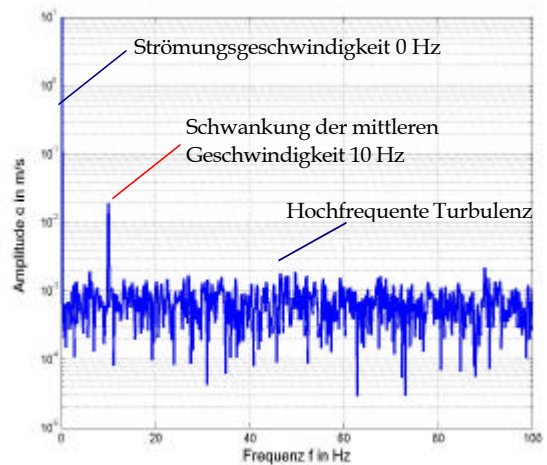
**Schwankung der mittleren Geschwindigkeit - Turbulenzdefinition**

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  $\bar{c}$  und deren Schwankung  $c'$  zusammen:  $c = \bar{c} + c'$  [10]. Schwankt auch die

Komponente  $\bar{c}$ , so spricht man von der Schwankung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Die Bilder 4a und 4b zeigen eine simulierte turbulente Strömung (Sinussignal überlagert mit Rauschen).



a) Zeitsignal



b) Frequenzspektrum

Bild 4: Beispiel einer turbulenten Strömung.

Den Unterschied zwischen der Turbulenz (im Bild 4a blau dargestellt) und der Schwankung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (im Bild 4a 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 4 ersichtlich, ist die Turbulenz von einer höheren Frequenz als die Schwankung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.

In der Fachliteratur findet man nur wenige Aussagen, in welchen Frequenzbereichen die Turbulenz und die Schwankung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit definiert sind. Für die Ermittlung der

Anströmgeschwindigkeit einer Windenergieanlage werden üblicherweise 10-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit verwendet. Damit kann keine Angabe zu dem Turbulenzgrad erfolgen, weil die hochfrequenten Geschwindigkeitsschwankungen nicht erfasst werden. In der Meteorologie werden die niederfrequenten Schwankungen oft als Turbulenz bezeichnet. Deshalb sollte man bei jeder Turbulenzmessung den verwendeten Frequenzbereich der Geschwindigkeitsschwankung mit angeben.

## Berechnung des Turbulenzgrades

Der Betrag der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{c}$  in einer dreidimensionalen Strömung wird aus dem zeitlichen Mittelwert jeder Geschwindigkeitskomponente bestimmt:

$$\bar{c} = \sqrt{\bar{c}_x^2 + \bar{c}_y^2 + \bar{c}_z^2} \quad (1)$$

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

$$|\bar{c}'| = \sqrt{\frac{c_x'^2 + c_y'^2 + c_z'^2}{3}} \quad (2)$$

Das Verhältnis der beiden Beträge ist der Turbulenzgrad  $Tu$ , ein Maß für die relative Größe der Geschwindigkeitsschwankungen in einer Strömung (Gleichung (3) [10]):

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

Bei einer isotropen Strömung sind die Geschwindigkeitsschwankungen in  $x$ ,  $y$  und  $z$  Richtung identisch:  $\overline{c_x'^2} = \overline{c_y'^2} = \overline{c_z'^2} = \overline{c'^2}$ . In diesem Fall spricht man von einer isotropen Turbulenz [10]:

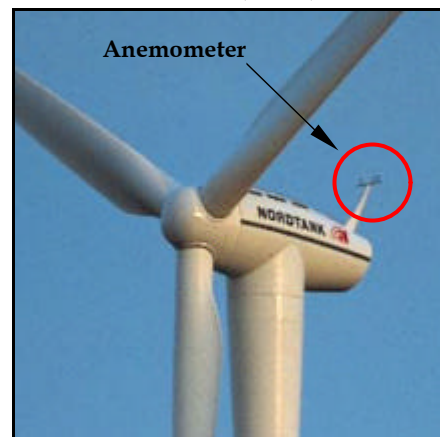
$$Tu_{\text{isotrop}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{3 \cdot \overline{c'^2}}{\bar{c}_x^2 + \bar{c}_y^2 + \bar{c}_z^2}} = \frac{\sqrt{\overline{c'^2}}}{\bar{c}} \quad (4)$$

Die Schwankungsgröße  $c'$  kann gemessen werden, Voraussetzung dafür ist, dass die Messmittel eine hohe zeitliche Auflösung haben, um den schnellen Fluktuationen der Strömung folgen zu können [3]. Es eignen sich Hitzdraht-, Heißfilm-, und Ultraschallanemometer. Mit Hilfe einer Frequenzanalyse lässt sich die Schwankungsgröße  $c'$  des Zeitsignals ermitteln. In der Meteorologie, vgl. [5], wird der Turbulenzgrad über die Standardabweichung  $s$ , Gleichung (5), bestimmt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}, \quad Tu = \frac{\sigma}{\bar{c}} \quad (5)$$

## Anemometer in der Praxis

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 die Windgeschwindigkeit mit Hilfe von Halbschalenanemometern auf der Gondel hinter den Rotorblättern erfasst (Bild 5).



**Bild 5:** Positionierung der Anemometer auf Windenergieanlagen [4].

Die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe wird gemäß [4] nur gemessen, um festzustellen, ob genügend Wind zur Verfügung steht. In diesem Fall werden die Rotorblätter in den Wind gedreht. 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, wie 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 Leistungskurve werden diese Kosten in Kauf genommen, weil eine genaue Bestimmung der Windgeschwindigkeit für diese Zwecke unumgänglich ist.

## Kalibrierung im Windkanal

Um den Einfluss der verschiedenen Strömungseigenschaften auf die unterschiedlichen Bauarten der Anemometer feststellen zu können, wurde jedes Anemometer nach einer festgelegten Prozedur untersucht. Eine senkrechte Einbauweise des Anemometers wurde in der Mitte des Windkanals als Referenz gewählt. Untersucht wurden der Einfluss einer 10 Grad Schräg- sowie einer turbulenten Anströmung. 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.

Die Messwerte wurden in ein Kalibrierprotokoll [1] übertragen. In dem Protokoll sind eine Kalibrierkurve mit den direkten Messwerten und den entsprechenden Abweichungen zu der Kalibriergeraden, eine Standardabweichung und ein Korrelationskoeffizient 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:

- Normalanströmung als Referenz,
- Schräganströmung,
- und turbulenter Anströmung.

Exemplarisch ist eines dieser Kalibrierprotokolle in **Bild 6** dargestellt.

### Schrägstellung der Anemometer

Die Anemometer sind für die Messung einer 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

report of		<b>Normalanströmung</b>		FACHHOCHSCHULE DÜSSELDORF	
anemometer manufacturer:	Thies / Windtest	Customer:		date:	19.03.01 Unterschrift
type:	Schalenkreuz	in charge:	Deiss, Lackmann	checked:	Deiss, Lackmann
serial number:	4.3303.22.000				
converter:	-				

<b>first calibration:</b>		<b>optional: second calibration</b>	
date of calibration:	19.03.01	date of calibration:	
data file:	C:\Anwender\Deiss_Lack\Diplomarb	data file:	
air pressure:	1009,8 hPa	air pressure:	
air temperature:	22,6 °C	air temperature:	
humidity:	32,8 %	humidity:	
position factor:	-	position factor:	
calibration P Pra, IFS:	-	calibration P Pra, IFS:	
software version:	-	software version:	

the complete procedure is documentet in in the diploma thesis  
**Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluß der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen**

first		second	
flow speed [m/s]	frequency at speed [Hz]	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]			
0,999909			

regression line (4 to 16 m/s):  
 $V[m/s] = 0,049 [m/s] + 0,5522 [m/s]/[Hz] \cdot \text{frequency}$

standard deviation	[m/s]
correlation coefficient $r$	

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 %		

<b>Remarks</b>	Calibration in the wind tunnel of the "Institut für Strömungsmaschinen" (Fachhochschule Düsseldorf)
----------------	---

**Bild 6:** Beispiel eines Kalibrierprotokolls.

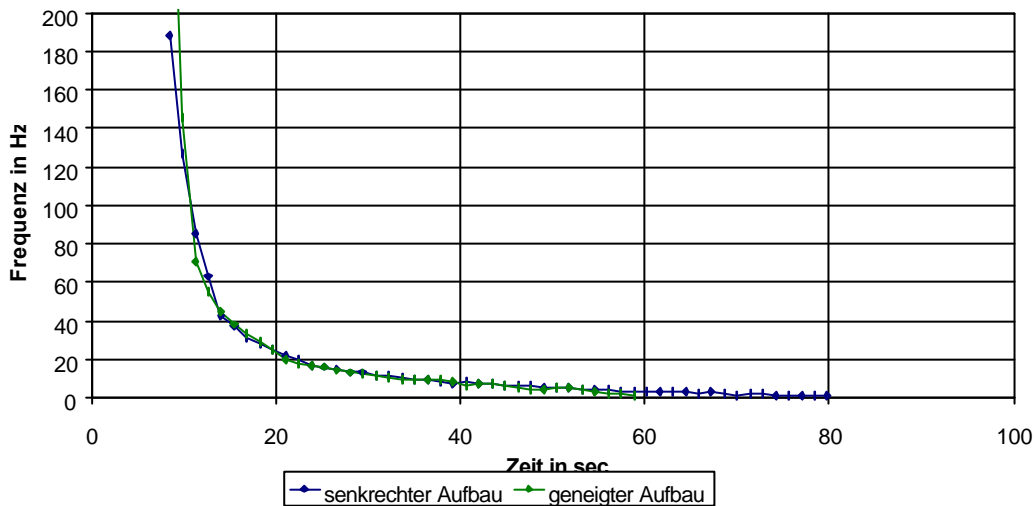
realisieren. **Bild 7** zeigt, dass die aufgenommenen Werte zwischen geneigtem und nicht geneigtem Betrieb übereinstimmen. Somit wird die Simulation der Schräganströmung durch die Neigung der Anemometer möglich.

**Bild 8** zeigt einen Vergleich verschiedener Anemometer, die sich im Nachlaufverhalten alle sehr ähneln. 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.

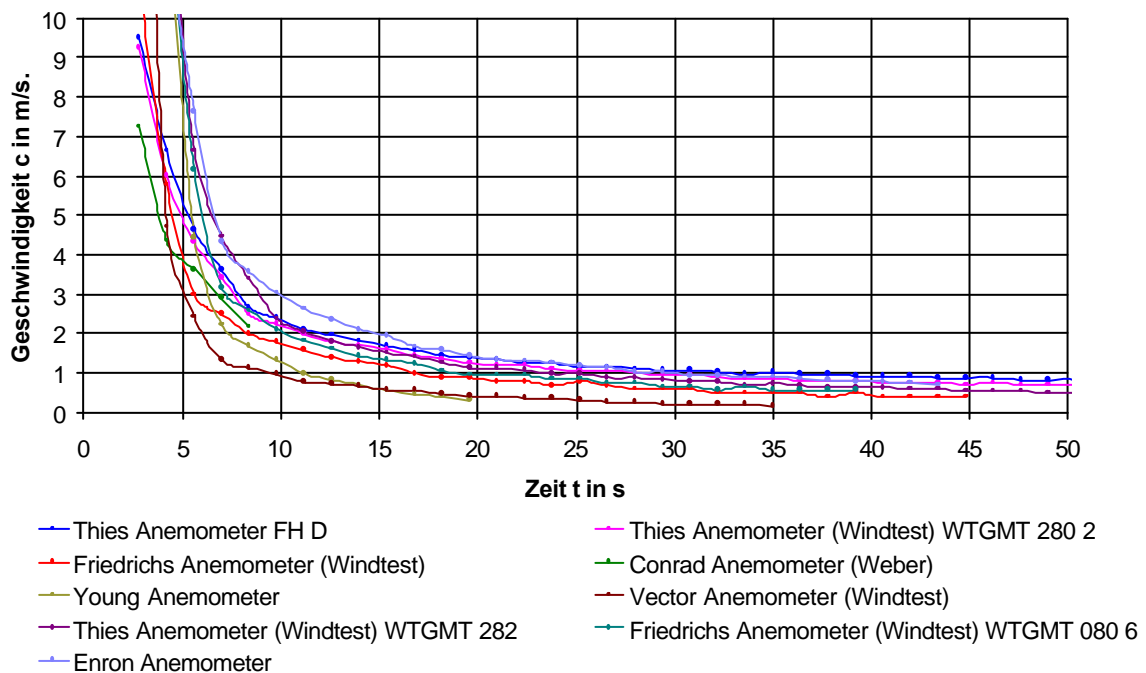
### Variation der Turbulenz

Um den Einfluss der Turbulenz auf die Anemometer zu untersuchen, wurden verschiedene Methoden zur Turbulenzerzeugung im Windkanal getestet.

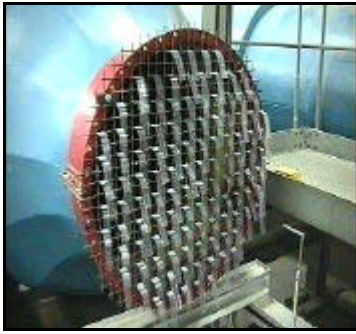
Aufgrund von Messungen des Turbulenzgrades mit einer Fiberfilmsonde ist ein Turbulenzerzeuger, vgl. **Bild 9**, ausgewählt worden. Mit Hilfe von ca. 10 cm langen Folienstreifen, die an einem Gitter befestigt waren, ist die turbulente Strömung erzeugt worden. Die Streifen erhöhten den Turbulenzgrad von 0,2 % auf 6 %. Somit war eine 30-fache Erhöhung der Turbulenz gegeben, mit der die Anemometer hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit auf höhere Turbulenzen untersucht werden konnten. Der Turbulenzgrad wurde mittels Digitalmultimeter und HP-Frequenzanalysator HP 35665A (10-1600 Hz) ermittelt, höhere Frequenzanteile wirkten sich bei der Berechnung des Turbulenzgrades nicht weiter aus.



**Bild 7:** Einwirkung der 10 Grad Neigung auf das Nachlaufverhalten des THIES Anemometers.



**Bild 8:** Nachlaufverhalten verschiedener Anemometer im Vergleich, horizontale Anströmung.



**Bild 9** Turbulenzerzeuger

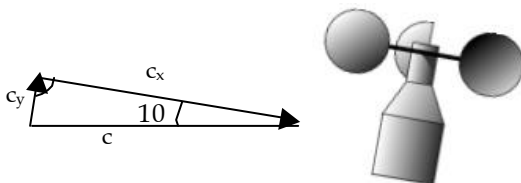
## Messergebnisse

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 (Frequenz oder DC-Signal). Die Geräte mit DC-Ausgangssignal haben einen höheren Anlaufwiderstand aufgrund des eingebauten „Minigenerators“.

In den Bildern 13 und 14 sind auf der linken Achse die direkten Ausgangssignale der Anemometer (z.B. Frequenz) über die Strömungsgeschwindigkeit des Windkanals aufgetragen. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgte mit Hilfe eines Prandtl'schen Staurohrs. Auf der rechten Achse ist die jeweilige Abweichung der einzelnen Trendlinien zur als Referenz dienenden Normalanströmung aufgetragen (♣: linke Achse; ○: rechte Achse). Im idealen Fall liegen die Trendlinien der Normalanströmung und die der turbulenten Anströmung übereinander.

Man geht davon aus, dass die Anemometer eine Geschwindigkeitskomponente senkrecht zu ihrer Drehachse messen. Nach **Bild 10** sollte bei einem Schrägeinbau das Anemometer nur diese senkrechte Komponente messen ( $c_x$ -Komponente) und somit einen kleineren Messwert anzeigen. Die Abweichung ist mit Hilfe der einfachen Winkelfunktion  $c_x = c \cdot \cos 10^\circ$  berechnet worden.

Die berechneten Abweichungen, die durch die schräge Anströmung zustande kommen, sind in den



**Bild 10:** Darstellung der Schrägeanströmung.

Diagrammen mit einer rot gestrichelten Linie als „ideale“ Abweichung zu den Werten der Normalanströmung dargestellt. Falls die roten Kreise in den Diagrammen auf diese Linie fallen, misst das Anemometer den korrekten Wert  $c_x$  bei einer 10 Grad Schrägeanströmung.

Die durchschnittlichen Abweichungen unter 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 Schrägeanströmungen beziehen sich auf die berechneten idealen Werte (rot gestrichelte Linie).

## Anemometer der Firma THIES GmbH

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



**Bild 11:** THIES Typ 4.3303.22.000.

Ausgangssignal: TTL-Signal

Maximale Belastung: 60 m/s

**Abweichung 1: 1,5 %**

**Abweichung 2: 5,9 %**

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

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

In Bezug auf die Schrägeanströmung sind bei diesem Anemometer die besten Ergebnisse erzielt worden. Hier liegen die Messpunkte alle in direkter Nähe der (rot gestrichelten) Ideallinie. Bei turbulenter Anströmung sind um 5,9 % zu hohe Messwerte aufgenommen worden.

## Anemometer der Firma Vector Instruments

Dieses Anemometer hat kegelförmige Halbschalen und es hat von den vermessenen Anemometertypen die geringsten Abweichungen bei einer turbulenten Anströmung (2,2 % zu hohe Werte). Auch bei einer Schräganströmung sind recht genaue Werte mit einer durchschnittlichen Abweichung von 2,1% gemessen worden.



Bild 12 Vector A100L2 [30]

Schalenform: kegelige Halbschalen

Ausgangssignal: TTL-Signal

Maximale Belastung: 75 m/s

Abweichung 1: 2,1 %

Abweichung 2: 2,2 %

## Anemometer der Firma METEK GmbH

Das Ultraschallanemometer USA-1 der Firma METEK (Bild 2) kann alle drei Komponenten der Strömungsrichtung (x, y, z), die Temperatur und den

Turbulenzgrad messen. Es besteht die Möglichkeit eine Samplingrate von 0,1-40 Hz einzustellen und festzulegen, ob gemittelte Werte oder Rohdaten ausgegeben werden sollen. Der Messbereich erstreckt sich bis 60 m/s. Auf eine schräge Anströmung ist verzichtet worden, da dieses Gerät in allen Koordinatenrichtungen die Strömungsgeschwindigkeit bestimmen kann. Bei turbulenter Anströmung wird ein um 2,5% zu hoher Wert gemessen.

## Vergleich der Kalibrierungen

Anhand der Bilder 13 und 14 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 kegelförmigen Halbschalen geringere Abweichungen bei Turbulenzen anzeigen, als die kugelförmigen. Ein direkter Vergleich der Anemometer bei unterschiedlichen Anströmbedingungen ist in den Bildern 15 und 16 dargestellt. Die Abweichungen zu der Normalanströmung sind auf der y-Achse aufgetragen.

Gleiche Bauarten der Anemometer weisen gleiche Kurvenverläufe auf. Mit steigender Geschwindigkeit ändert sich die Steigung der Kurven. Tendenziell sinkt bei einer Schräganströmung die Steigung und bei einer turbulenten Anströmung steigt sie.

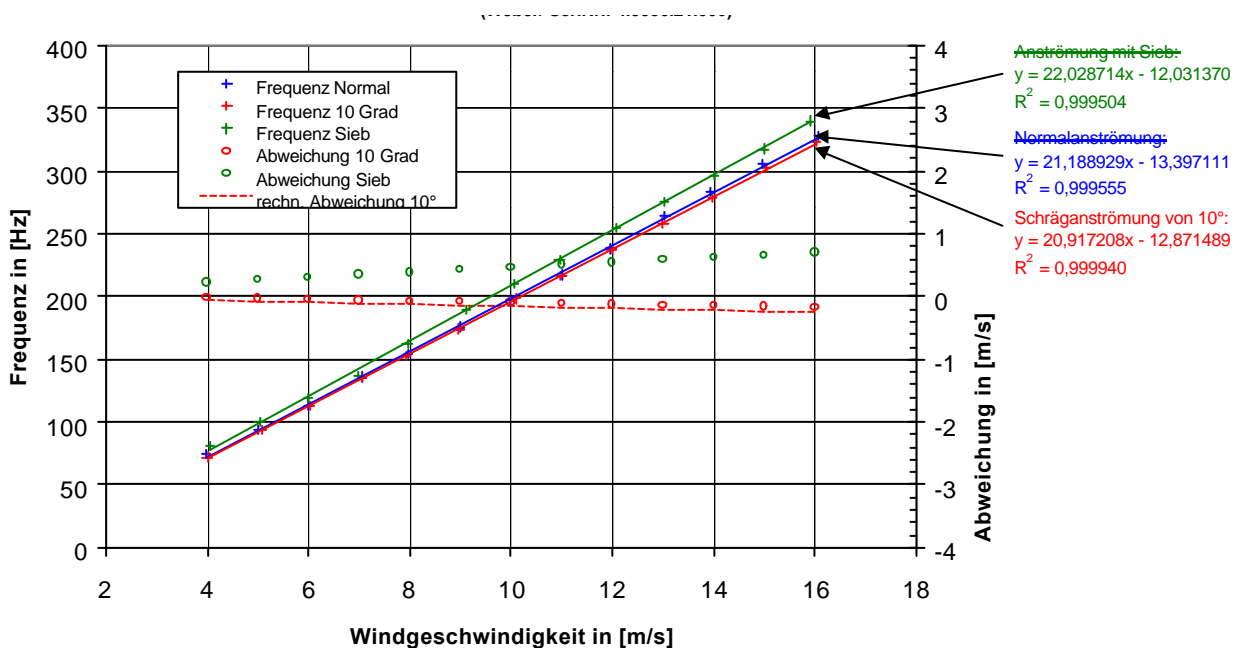


Bild 13: Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; THIES der FH Düsseldorf.



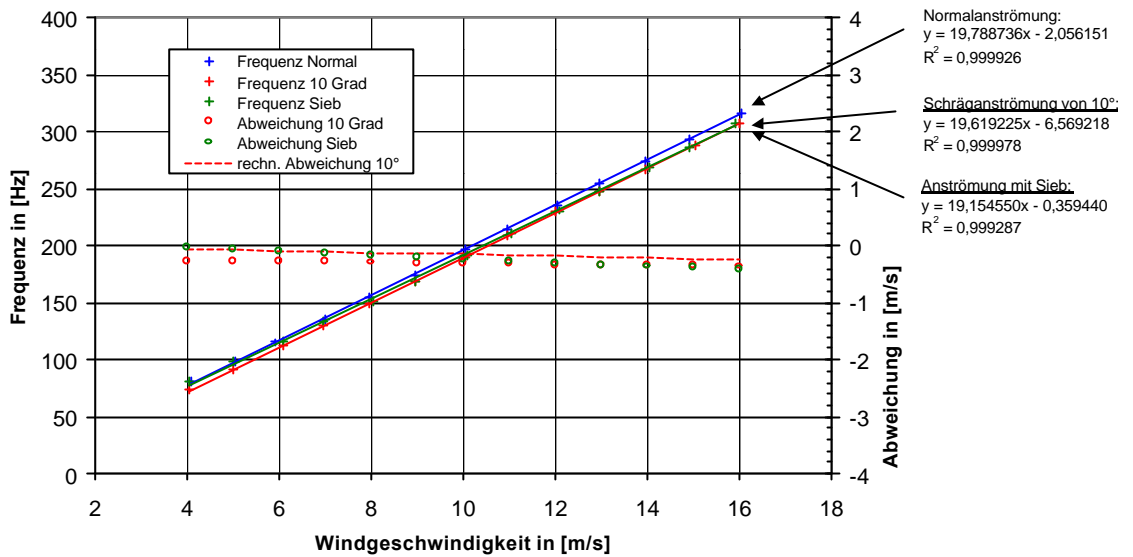


Bild 14 : Vergleich unterschiedlicher Anströmungen; Vector WTGMT501.

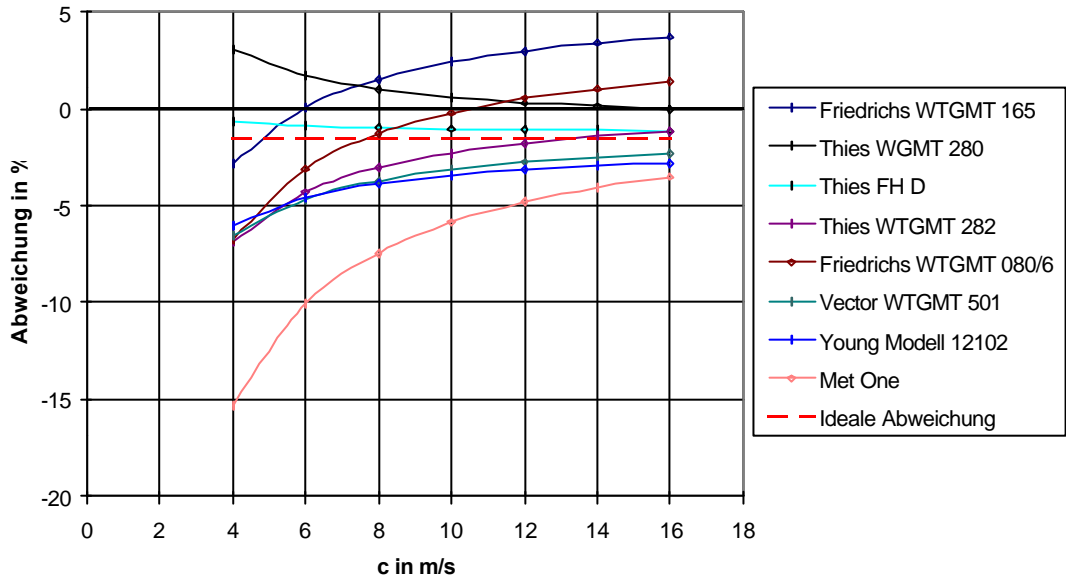


Bild 15: Direkter Vergleich der Anemometer bei einer Schräganströmung.

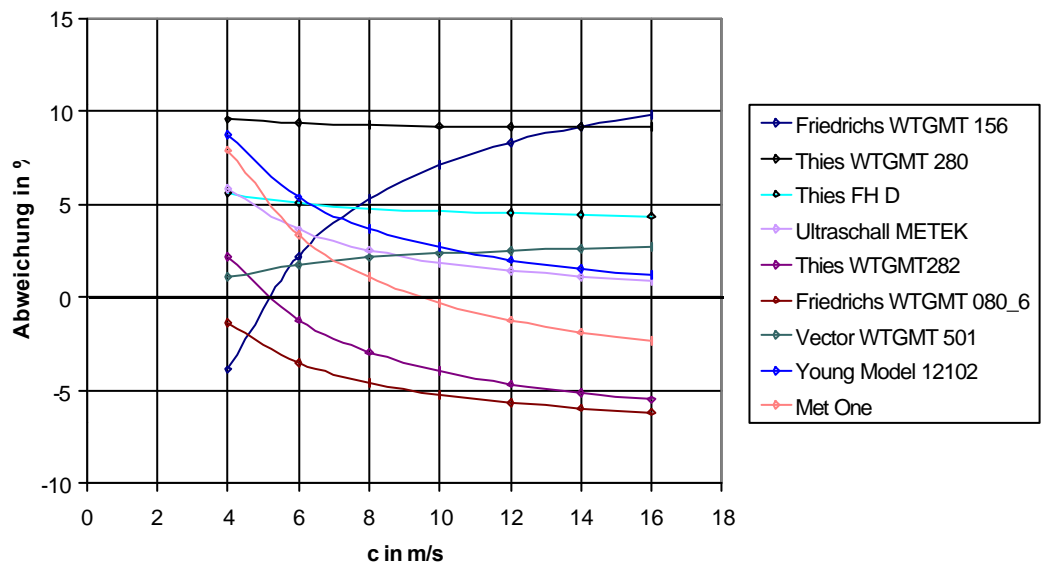
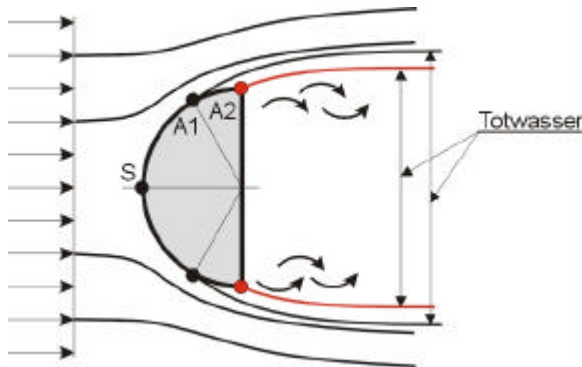


Bild 16: Direkter Vergleich der Anemometer bei einer turbulenten Anströmung.

## Strömungswiderstand einer umströmten Kugel

Der Grund für die Drehzahlerhöhung des Halbkugelanemometers bei einer turbulenten Anströmung ist vermutlich mit der Verschiebung des Ablösepunktes der Strömung zu erklären. In **Bild 17** ist diese Ursache veranschaulicht worden. Hier soll die Stromlinie, die vom Ablösepunkt A1 entspringt, den laminaren Fall darstellen. Die rote Linie, die aus dem Ablösepunkt A2 startet, zeigt den Fall bei einer turbulenten Anströmung. Durch dieses Verhalten verkleinert sich im zweiten Fall das Totwassergebiet und somit auch der  $c_w$ -Wert und die Drehzahl steigt. Kegelige Halbschalen sind hinsichtlich der Verschiebung des Ablösepunktes unempfindlicher, da der Ablösepunkt aufgrund der stärker beschleunigten Wandgrenzschicht stets dem Punkt A2 entspricht.



**Bild 17:** Änderung des Totwassergebietes bei erhöhter Turbulenz (schematisch).

## Zusammenfassung

Aufgabe der vorliegenden Untersuchung war es, den Einfluss der Turbulenz und der schrägen Anströmung bei der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit mit unterschiedlichen Anemometern zu bestimmen. Der Vergleich unterschiedlicher Kalibrierkurven der Anemometer zeigt, dass die Turbulenz grundsätzlich einen Einfluss auf die Messwerte aller untersuchten Anemometer hat. Die kegeligen Anemometer zeigen bei einer turbulenten Strömung einen um 2,2 % erhöhten Wert an. Die Anemometer mit den Halbkugeln haben unter diesen Bedingungen einen Messfehler von 5,9 %. Die Messungen mit dem Ultraschallanemometer bei der turbulenten Anströmung ergaben eine Abweichung von 2,5 Prozent.

Bei einer schrägen Anströmung von bis zu 10 Grad wurden gleiche Tendenzen bei Halbkugelanemometern und den Halbkegelanemometern

festgestellt, beide Anemometertypen zeigten Abweichungen von etwa 2 %.

Sollte bei einer Windmessung erhöhte Turbulenz und zusätzlich noch eine Schräganströmung auftreten, so sind im Rahmen der vorliegenden Untersuchung Fehler von bis zu 10% gemessen worden.

Bei erhöhter Turbulenz der Anströmung und gleichbleibenden Versuchs- und Messbedingungen ist alleine durch den Wechsel der Halbschalenform mit unterschiedlichen Leistungskurven von Windenergieanlagen zu rechnen. Für die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit wird in der Praxis der Einsatz eines Ultraschallanemometers oder eines Anemometers mit kegeligen Halbschalen empfohlen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Deiss, O., Lackmann, F.: Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluss der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen, Diplomarbeit, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik Fachhochschule Düsseldorf, 2001.  
<http://ifs.muv.fh-duesseldorf.de/diplomar.htm>
- [2] THIES GmbH & Co. KG, [www.thiesclima.com](http://www.thiesclima.com), Göttingen, 2001.
- [3] Fiedler, O.: Strömungs- und Durchflussmesstechnik, München, 1992.
- [4] Verband der dänischen Windkraftindustrie, [www.windpower.dk](http://www.windpower.dk), Kopenhagen, 2001.
- [5] VDI-Richtlinie 3786: Turbulenzmessung mit Ultraschall-Anemometern, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1994.
- [6] Kameier, F.: Volumenstrombestimmung mittels Ultraschall - Praxiserprobung an industriellen Ventilatoren, Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik, Frankfurt, 2000.
- [7] AMMONIT Gesellschaft für Messtechnik mbH, [www.ammonit.de](http://www.ammonit.de), Berlin, 2001.
- [8] METEK GmbH, [www.metek.de](http://www.metek.de), Elmshorn, 2001.
- [9] Gasch, R. (Hrsg.): Windkraftanlagen, Stuttgart, 1996.
- [10] Schade, H., Kunz, E.: Strömungslehre, Berlin, 1989.