

## GEOMETRISCHE EINFLÜSSE BEI DER KALIBRIERUNG VON STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITSENSOREN IN WINDKANÄLEN

### GEOMETRICAL INFLUENCES CALIBRATING FLOW-VELOCITY SENSORS IN WIND TUNNELS

**Mathias Rohm\***, **Harald Müller\*\***, **Jessica Kampe\*\***

\* E+E Elektronik, \*\* PTB Braunschweig

Kalibrierung von Luftgeschwindigkeit, Kalibrierung mit Laser Doppler Anemometer  
Calibration of air velocity, calibration with Laser Doppler Anemometer

#### Zusammenfassung

Laser Doppler Anemometer ermöglichen die sehr genaue Referenzierung der Strömungsgeschwindigkeit in einem Windkanal für die Kalibrierung von Anemometern unterschiedlicher Bauart (Heißfilm- Hitzdraht und Flügelradanemometern...). In dieser Studie werden auftretende Abweichungen zwischen unterschiedlichen Kalibrierlaboratorien auf geometrische Einflussfaktoren des Windkanals und des Prüflings hin untersucht. Dazu werden die Resultate von Kalibrierungen mit einem handelsübliches Heißfilm- Anemometer in diversen geometrisch unterschiedlichen Windkanälen und bei unterschiedlichen geometrischen Anordnungen miteinander verglichen und interpretiert.

#### Einleitung

Hitzdraht-, Heißfilm- oder Flügelrad- Anemometer haben sich in der Praxis als beliebtes Messinstrument für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit für industrielle Anwendungen, z.B. zur Überwachung von Lüftungen, oder zur Bestimmung des Volumen oder Massenstromes in Rohrleitungen etabliert. Die Messfühler bestehen grundsätzlich aus einem meist kreisrunden Fühlerstab an dessen Ende der Strömungssensor fixiert ist. Um den Sensor zu schützen wird dieser durch eine Kopfkonstruktion geschützt.

Um eine hohe Qualität der Produkte gewährleisten zu können, wird ein entsprechend großer Aufwand betrieben um die Messgeräte zu justieren beziehungsweise zu kalibrieren. Dazu werden die Sensoren in einem Windkanal mit einem Referenzgerät verglichen.

Die dazu verwendeten Windkanäle, meist kleinerer Dimensionen, produzieren ein sehr homogenes und turbulenzarmes Strömungsfeld, was unter Verwendung eines Laser-Doppler Anemometers eine Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit mit sehr kleinen Unsicherheiten ermöglicht.

Im Rahmen eines EUROMET Projektes 388 „Intercomparison of anemometers“ wurde deutlich, dass die Kalibrierergebnisse für die eingesetzten Anemometer im Rahmen der dokumentierten Messunsicherheiten nur bedingt vergleichbar sind. In diesem Ringvergleich wurden 3 Flügelrad-Anemometer verschiedener Bauform in 15 Kalibrierlabors mit dem jeweiligen nationalen Standards verglichen.

Dabei wurde auch zwischen den Instituten mit LDA als Referenz, bis zu 10% Abweichung festgestellt. Da bisher keine Richtlinien für LDA gestützte Kalibrierungen von Anemometern

## 42.2

in Windkanälen bestehen, wird als Hauptursache für die aufgetretenen Abweichungen die unterschiedliche Referenzierung der Strömungsgeschwindigkeit angenommen.

Vom Anemometer wird abhängig von seiner Geometrie ein Teil der Strömung geblockt (Blockage Effekt), und nach vorne aufgestaut. Dadurch wird die Strömungsgeschwindigkeit in einem Bereich vor dem Fühler beeinflusst (Abbildung 2). In der von Müller et al. bei der GALA 2006 vorgestellten Untersuchung „Einsatz der Laser Doppler Anemometrie für die Kalibrierung von Anemometern in Windkanälen“ ist dieser Effekt für das in dieser Studie verwendete Anemometer ausgemessen.

Grundsätzlich muss der Referenzpunkt des Laser-Doppler Anemometers außerhalb dieser beeinflussten Zone gewählt werden. Die Abweichungen des Strömungsfeldes zwischen dem Referenzpunkt und dem Kalibrierpunkt muss mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt werden.

Betrachtet man die maximalen Abweichungen der einzelnen Anemometer mit der vom Anemometer blockierten Fläche beim EUROMET Projekt 388, so ist jedoch eher ein gegenläufiger Effekt erkennbar (Abbildung 1).

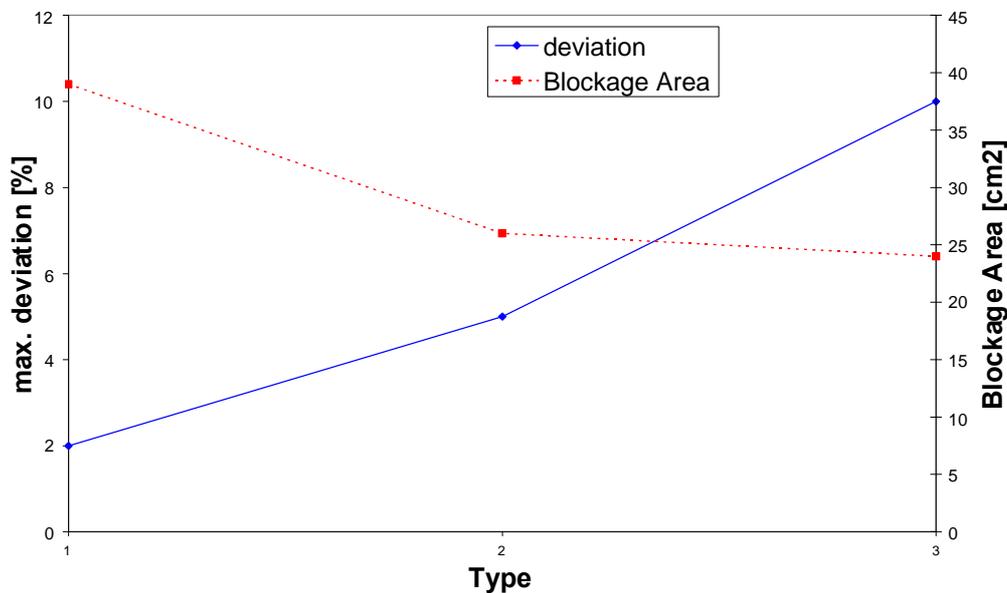


Abbildung 1 Gegenüberstellung Blockage-Fläche und maximale Abweichungen beim EUROMET Ringversuch 388

Das bedeutet, dass trotz weit größerer blockierender Fläche beim Anemometer Typ 1 bei weitem kleinere Abweichungen zwischen den Kalibrierungen festgestellt wurden als beim Anemometer Typ 2. Dabei wird deutlich dass die beim EUROMET-Ringversuch entstandenen Abweichungen auch von anderen Einflussgröße geprägt sein müssen.

Ziel dieser Studie ist es, die Abweichungen zwischen den Kalibrierungen auf geometrische Einflussfaktoren des Windkanals und des Prüflings hin zu untersuchen.

Die Geometrie des Messaufbaues setzt sich aus der Geometrie des Windkanals, (offene oder geschlossene Teststrecke, Dimensionen, Homogenität des Strömungsprofils...) und aus der Geometrie des Fühlers (Durchmesser, Länge, Bauform) zusammen.

Durch die großen Unterschiede in Bauart und Größe der Windkanäle entstehen zwangsläufig auch Unterschiede in der geometrischen Anordnung des Anemometers im Strömungsprofil (Abbildung 2).

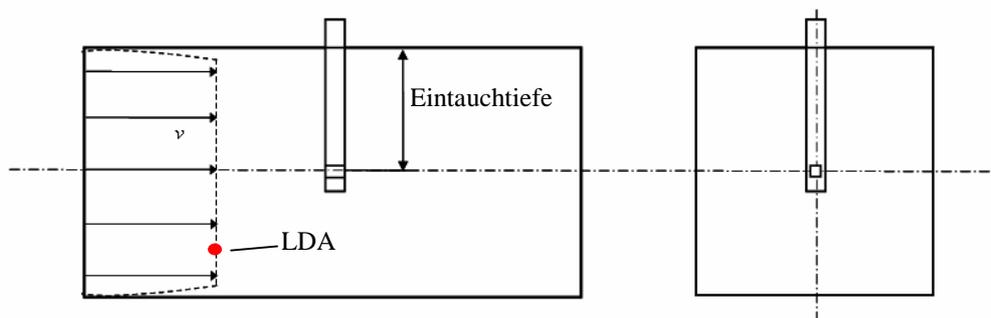


Abbildung 2 Anordnung von Referenz und Prüfling bei einer Anemometerkalibrierung

Abbildung 3 zeigt die über die diversen Geschwindigkeiten gemittelten Abweichungen der verschiedenen Kalibrierungen des EUROMET-Ringversuches 388 im Verhältnis zur Kalibrierung der PTB Deutschland (Referenz LDA). Die Abweichungen sind bei der jeweiligen Eintauchtiefe des Anemometers aufgetragen, dem Abstand des Messpunktes des Anemometers zur Randschicht. Dabei wird vorausgesetzt, dass alle Anemometer im Zentrum des Strömungsprofils kalibriert wurden.

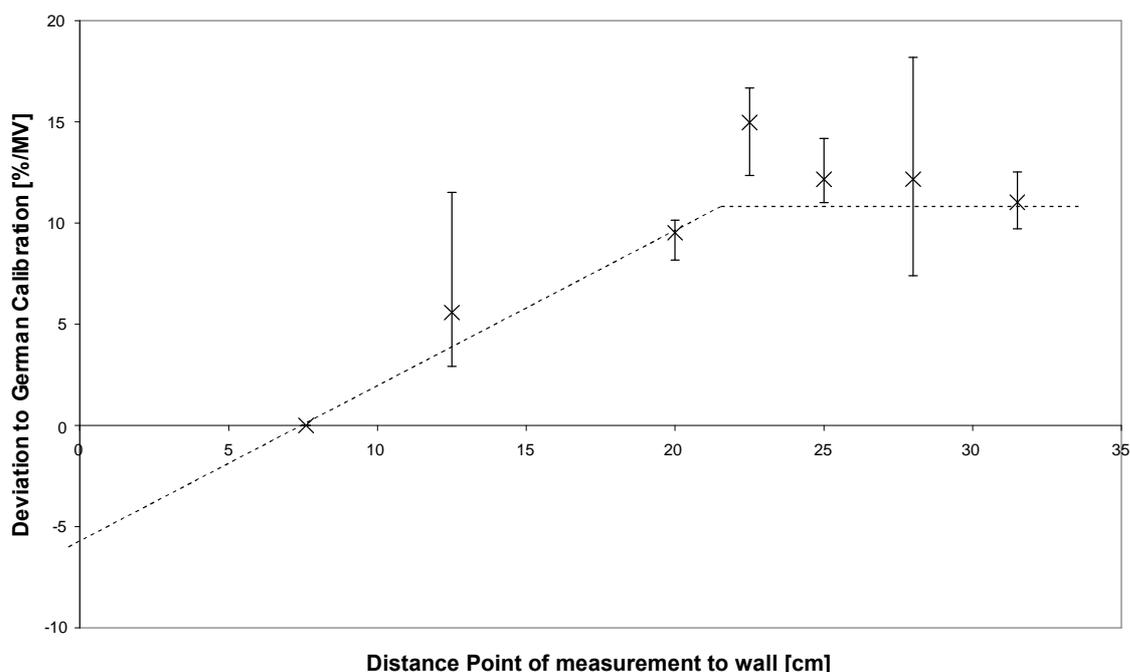


Abbildung 3 : Abweichungen der Kalibrierungen verschiedenster Laboratorien zur Kalibrierung der PTB aufgetragen über die verwendete Eintauchtiefe des Messfühlers (Typ 3).

Die deutsche Kalibrierung wurde in einem Winkanal mit offener Messstrecke mit einem Durchmesser von nur 15 cm durchgeführt. Das bedeutet, dass das Anemometer, bei Platzierung im Zentrum des Strömungsprofils, 7,5 cm in die Strömung eingetaucht wird. Das Diagramm zeigt, dass bei wachsender Eintauchtiefe bis ca. 22 cm die Abweichungen zur Referenzkalibrierung näherungsweise linear steigen. Ab diesem Punkt bleiben die Abweichungen konstant. Interessant dabei ist, dass von diesem Punkt an der gesamte Fühler in der Strömung platziert ist.

# 42.4

## Experimente:

Mit den folgenden Experimenten soll der Einfluss unterschiedlicher Installationen eines Anemometers in unterschiedlichen Windkanälen auf das Kalibrierresultat untersucht werden. Dazu wird ein handelsübliches Heißfilm- Anemometer mit einem Durchmesser von nur 8mm verwendet (Abbildung 4). Die Einflüsse von Temperatur und atmosphärischem Druck sind sehr genau bekannt und werden korrigiert.



Abbildung 4 Heißfilmanemometer mit einem Fühlerdurchmesser von 8mm

Die Kalibrierungen wurden in zwei sehr unterschiedlichen Windkanälen durchgeführt:

Labor	Düsen-Dimension	Messstrecke	Referenz
E+E	Ø 0,255 m	offen	LDA
CETIAT	□ 0,5 m	geschlossen	LDA

Um den Einfluss des „Blockage-Effektes“ auf das Resultat zu minimieren wird in beiden Kanälen als Referenz für die Strömungsgeschwindigkeit ein Laser Doppler Anemometer verwendet. Der Messpunkt des LDA's wird dazu stromaufwärts des Prüflings angeordnet, wo die Strömung nicht mehr vom Prüfling beeinflusst wird.

In beiden Windkanälen wurden Kalibrierungen bei verschiedenen Eintauchtiefen zwischen 2,5 und 25cm des Anemometers und bei diversen Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt.

Abbildung 5 zeigt die Abweichungen der Kalibrierungen in beiden Windkanälen zur Eintauchtiefe bei 5 und 15 m/s:

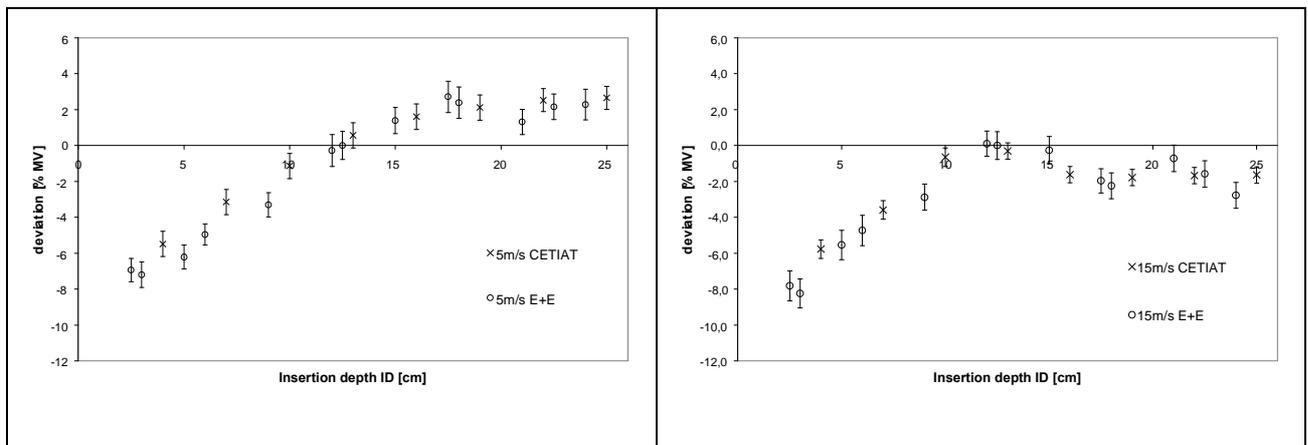


Abbildung 5 Vergleich der Abweichungen in Prozent zur Eintauchtiefe beider Windkanäle (E+E, CETIAT) bei 5 und 15m/s (Rohm,Cordier-Duperray,2007)

Bei allen Geschwindigkeiten zeigten die Abweichungen des Anemometers zur Referenzmessung eine ähnliche Charakteristik: ein lineares Ansteigen der Abweichungen mit der Eintauchtiefe bis zu einer bestimmten Eintauchtiefe. Bei noch größeren Eintauchtiefen blieb das Ergebnis annähernd unverändert.

Zusätzlich zeigte sich eine hohe Übereinstimmung zwischen den Kalibrierungen in den beiden Windkanälen wenn dieselbe Eintauchtiefe verwendet wurde. Das bedeutet, dass die Abweichungen nicht von der Geometrie des Windkanals abhängig sind, sondern hauptsächlich von der Eintauchtiefe des Anemometers.

Das Problem konnte schließlich mit Hilfe eines Vergleiches mit einer Umströmung eines endlichen Zylinders auf einer Platte bei paralleler Anströmung erklärt und charakterisiert werden. (Abbildung 6)

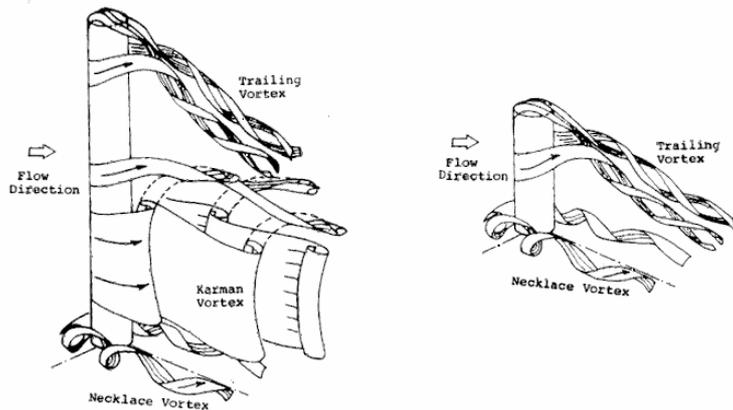


Abbildung 6 Umströmung eines kurzen und eines langen Zylinders (Kawamura 1984)

Bei niedrigen Längen-Durchmesser-Verhältnissen des Zylinders bildet sich rund um den Zylinder ein dreidimensionales Strömungsbild aus, das von der Interaktion des Kopfwirbel- mit dem Fußwirbelsystem geprägt wird. Das Sensorsignal am Kopf des Zylinders wird also vom Abstand zur Randschicht beeinflusst. Wird der Zylinder weiter in die Strömung eingeführt, bildet sich ab einem bestimmten Längen-Durchmesser-Verhältnis  $(l/d)_{krit}$  eine quasi-zweidimensionale Strömungsregion in der Mitte des Fühlerstabes aus. Der Einfluss zwischen Kopf- und Fußwirbelsystem wird dadurch gebrochen. Bei weiterem Einführen des Fühlers in die Strömung bleibt die Umströmung der Kopfkonstruktion gleich, nur die Region der quasi-zweidimensionalen Strömung vergrößert sich

# 42.6

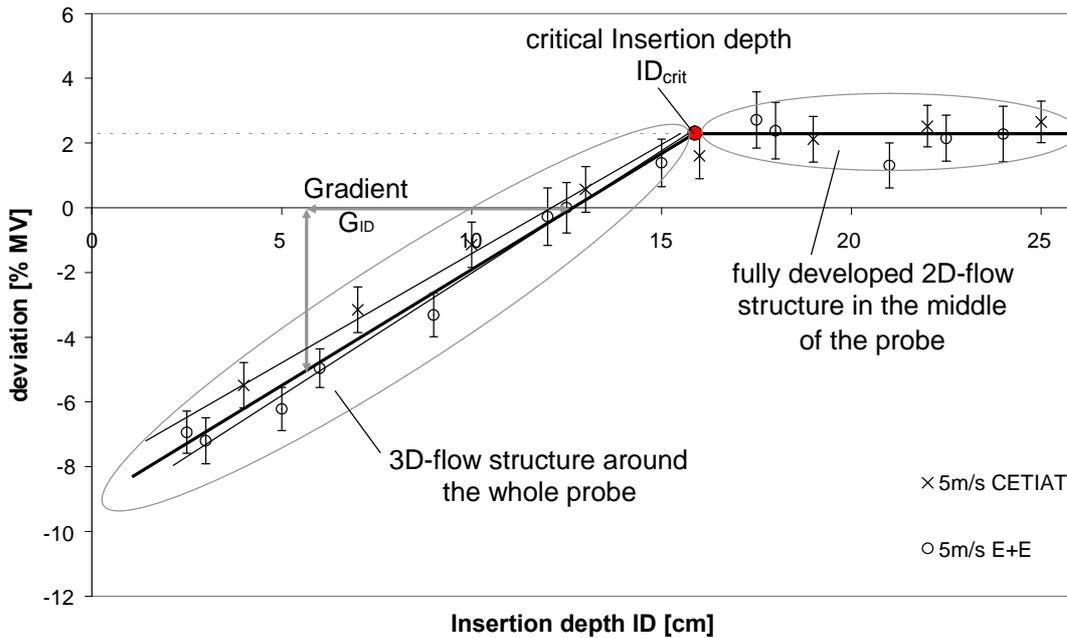


Abbildung 7 Charakteristik des Strömungsfühlers in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe bei 5m/s (Rohm, Cordier-Duperray, 2007)

Grundsätzlich kann diese Charakteristik mit einem dimensionslosen Parametern beschrieben werden (Rohm, Cordier-Duperray, 2007):

$$(l / d)_{crit} = \frac{ID_{crit}}{d} = f(\delta / l, Re),$$

das kritische Eintauchtiefen-Durchmesserverhältnis, ab der die Abweichungen konstant bleiben. Beim Vergleich der Ergebnisse bei verschiedenen Geschwindigkeiten konnte eine Abhängigkeit von der Reynoldszahl erkannt werden. Der Einfluss der Dicke der Randschicht  $\delta$  zur Eintauchtiefe des Anemometers ist sicher vorhanden, da jedoch beide Windkanäle über ein sehr homogenes Strömungsfeld, und daher über eine sehr kleine Randschichtdicke, verfügen, kann mit diesem Versuchen keine Aussage getroffen werden.

Die Steigung der Abweichungen bis zur kritischen Eintauchtiefe  $G_{ID}$  scheint jedoch in erster Linie abhängig von der Kopfkonstruktion zu sein. Leichte Änderungen sind jedoch auch hier von der Randschicht und der Reynoldszahl zu erwarten.

Parallel zu diesen Untersuchungen wurde in Kooperation von E+E Österreich und PTB Deutschland ein Ringversuch mit einem baugleichen Heißfilmanemometer durchgeführt. Das Anemometer wurde dabei in 3 deutschen Kalibrierlaboratorien nach deren Messstandard vermessen und mit der Kalibrierung von E+E Elektronik verglichen (Abbildung 8). Zwei Laboratorien verfügen über einen ähnlichen Windkanal wie E+E (Kal. 2, Kal. 3). Das dritte Labor kalibriert jedoch in einem Windkanal mit etwas kleinerem Düsendurchmesser.

Labor	Düsendurchmesser	Messstrecke	Referenz
E+E	0,255 m	offen	LDA
Kal.1	0,18 m	geschlossen	LDA
Kal.2	0,255 m	geschlossen	Differenzdruck
Kal.3	0,255 m	offen	LDA

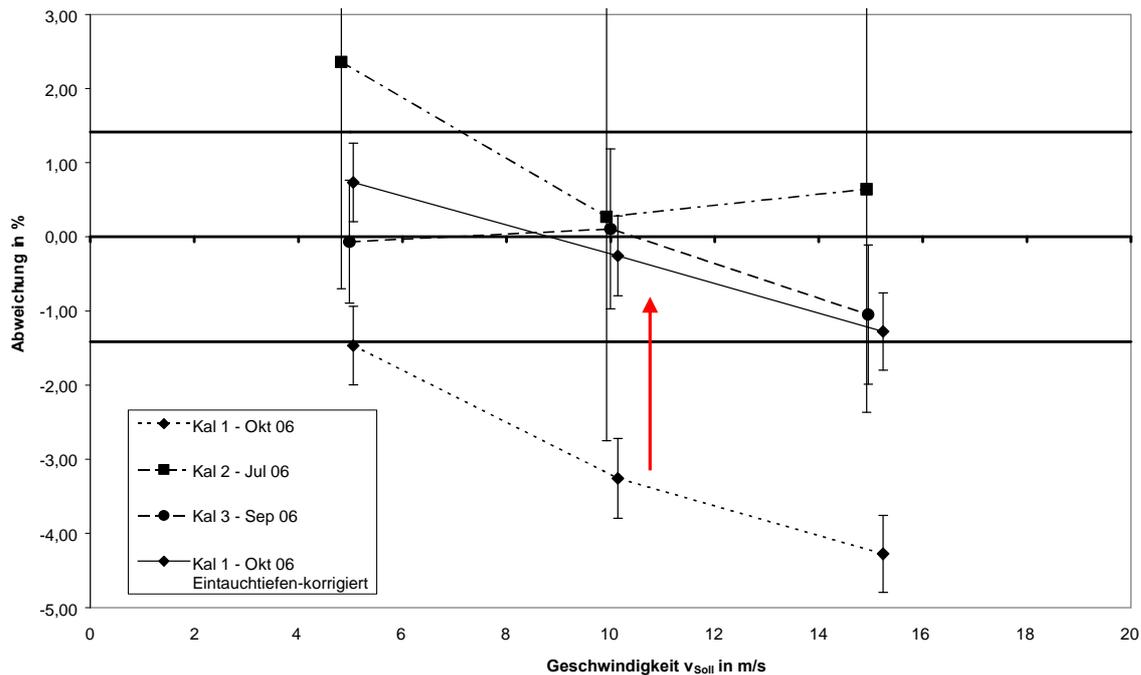


Abbildung 8 Kalibrierergebnisse der deutschen Kalibrierlaboratorien im Vergleich zur Kalibrierung von E+E, bzw. Korrektur der Ergebnisse nach Eintauchtiefe

Abbildung 8 zeigt die Kalibrierergebnisse der verschiedenen Laboratorien zur Referenz-Kalibrierung von E+E. Die Fehlergrenzen setzen sich aus der Messunsicherheit von E+E und einem Unsicherheitsbeitrag für die Winkelabhängigkeit des Heißfilmanemometers zusammen.

Die Kalibrierungen in den Windkanälen mit 0,255m Durchmesser liegen alle innerhalb der angegebenen Unsicherheiten. Deutlich zu erkennen sind jedoch die negativen Abweichungen des Kalibrierlabors 1, das in einem kleineren Windkanal, und dadurch bei einer kleineren Eintauchtiefe von 9cm kalibriert hatte. Bei allen anderen Windkanälen wurde mit einer Eintauchtiefe von 12,5cm kalibriert.

Korrigiert man das Ergebnis von Kal.1 mit den in Abbildung 5 dargestellten Abweichungen zwischen 9 und 12,5cm so rückt auch dieses Kalibrierergebnis in den Bereich der angegebenen Unsicherheiten.

### Zusammenfassung:

In diesem Paper haben wir gezeigt, dass das Messergebnis eines Strömungs- beeinflussenden Anemometers, wie eines Heißfilmanemometers, wesentlich von seiner geometrischen Installation in einem Windkanal beeinflusst wird

Die Kalibrierungen mit einem kommerziellen Heißfilmanemometer in mehreren geometrisch komplett unterschiedlichen Windkanälen zeigen eine ausgezeichnete Übereinstimmung, wenn das Anemometer mit derselben Eintauchtiefe in der Strömung platziert wird.

Typ und Dimensionen des Windkanals haben bei den durchgeführten Untersuchungen keinen wesentlichen Einfluss auf das Kalibrierresultat gezeigt.

## 42.8

Das Laser Doppler Anemometer ermöglicht eine unabhängige Darstellung der Luftgeschwindigkeit mit sehr kleinen Unsicherheiten.

Mit einer geeigneten Platzierung seines Messpunktes in einem vom Prüfling unbeeinflussten Bereich des Strömungsfeldes eignet es sich daher auch hervorragend zur Referenzierung der Strömungsgeschwindigkeit bei der Kalibrierung von Strömungssensoren.

Aber zum Vergleich von Kalibrierungen handelsüblicher Anemometer, die die Strömung beeinflussen, müssen Abweichungen durch geometrische Parameter wie die Eintauchtiefe, aber auch von Montagevorrichtungen berücksichtigt werden.

Diese Studie zeigt ein Beispiel wie geometrische Parameter die Kalibrierung von Anemometern beeinflussen können. Sie zeigt, dass es für zukünftige Vergleichsmessungen notwendig sein wird, diese geometrischen Parameter zu berücksichtigen. Dann wird es auch möglich sein vernünftige Interpretationen der Resultate zu finden.

### Literatur

Lerch, H, 1999: "Intercomparison of Anemometers", EUROMET Project No. 388, Draft Final Report, Part 1-3

Müller H., Pape, Sodomann, Kampe, Dopheide, 2006, "Einsatz der Laser-Doppler-Anemometrie für die Kalibrierung von Anemometern in Windkanälen", 14. Fachtagung, „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“- GALA 2006, Braunschweig, 5.-7.September 2006, article 17.

Rohm M., Cordier-Duperray Y., 2007 „Influence of the insertion depth on the response of a hot film anemometer in different wind tunnels“, 13th international Metrology Congress, Lille 2007

Kawamura, Hirwadam Hibino, Mabuchi, Kamuda, 1984 „Flow around a finite circular cylinder on a flat plate“, Bulletin of the JSME 27, S. 2430-2439.