

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



## DKD

---

**Vergleichsbericht  
DKD-V 11-1**

**Nationaler DKD-Ringvergleich für  
Strömungsgeschwindigkeit  
Transfornormal: Prandtl-Rohr mit  
Auswerteeinheit  
Kalibrierbereich: 5 m/s bis 50 m/s**

---

Ausgabe 05/2019

<https://doi.org/10.7795/550.20190424>



Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

	<b>Nationaler DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190424">https://doi.org/10.7795/550.20190424</a>	DKD-V 11-1	
		Ausgabe:	05/2019
		Revision:	0
		Seite:	2 / 25

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen seit der Gründung 1977 zusammengeschlossen. Am 03. Mai 2011 erfolgte die Neugründung des DKD als *technisches Gremium* der PTB und der akkreditierten Laboratorien.

Dieses Gremium trägt die Bezeichnung Deutscher Kalibrierdienst (DKD) und steht unter der Leitung der PTB. Die vom DKD erarbeiteten Richtlinien und Leitfäden stellen den Stand der Technik auf dem jeweiligen technischen Fachgebiet dar und stehen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) für die Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien zur Verfügung.

Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden von der DAkkS als Rechtsnachfolgerin des DKD akkreditiert und überwacht. Sie führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei der Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von der Normenfamilie DIN EN ISO 9000 und der DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert wird.

**Kontakt:**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)  
 DKD-Geschäftsstelle  
 Bundesallee 100      38116 Braunschweig  
 Postfach 33 45      38023 Braunschweig  
 Telefon Sekretariat: (05 31) 5 92-8021  
 Internet: [www.dkd.eu](http://www.dkd.eu)

	<b>Nationaler DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190424">https://doi.org/10.7795/550.20190424</a>	DKD-V 11-1	
		Ausgabe:	05/2019
		Revision:	0
		Seite:	3 / 25

*Zitiervorschlag für die Quellenangabe:*

*Vergleichsbericht DKD-V 11-1 Nationaler DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit, Transfornormal: Prandtl-Rohr mit Auswerteeinheit, Kalibrierbereich: 5 m/s bis 50 m/s, Ausgabe 05/2019, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20190424*

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt und unterliegt der Creative Commons Nutzerlizenz CC by-nc-nd 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>). In diesem Zusammenhang bedeutet „nicht-kommerziell“ (NC), dass das Werk nicht zum Zwecke der Einnahmenerzielung verbreitet oder öffentlich zugänglich gemacht werden darf. Eine Nutzung seiner Inhalte für die gewerbliche Verwendung in Laboratorien ist ausdrücklich erlaubt.



Autoren:

Dr. Harald Müller, PTB Braunschweig,

Dr. Arne Taube, Höntzsch GmbH Waiblingen

Teilnehmer am DKD-Ringvergleich (siehe Abschnitt 3, Tabelle 1 - Ansprechpartner)

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) als Ergebnis der Zusammenarbeit der PTB mit dem Fachausschuss „Strömungsmessgrößen“ des DKD.

	<b>Nationaler DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190424">https://doi.org/10.7795/550.20190424</a>	DKD-V 11-1	
		Ausgabe:	05/2019
		Revision:	0
		Seite:	4 / 25

## Vorwort

DKD-Vergleichsberichte verfolgen das Ziel, die Ergebnisse von Vergleichsmessungen offenzulegen, die im Rahmen des Deutschen Kalibrierdienstes organisiert, durchgeführt bzw. ausgewertet wurden. Sie enthalten zahlreiche Informationen über die Messfähigkeiten der teilnehmenden Kalibrierlaboratorien und die Vergleichbarkeit von Messungen. In den Vergleichsberichten wird die Sichtweise der Autoren wiedergegeben, die nicht notwendigerweise in allen Details der Sichtweise des Vorstands oder der Fachausschüsse des DKD entsprechen muss.

Die DKD-Vergleichsberichte sollen die im Vergleich untersuchten Aspekte und Ergebnisse der Kalibrierung darstellen und durch die Publikation im Rahmen des DKD der großen Gemeinschaft der Kalibrierlaboratorien national und international zugänglich machen.

Experten- und Vergleichsberichte müssen nicht vom Vorstand genehmigt werden (Beschluss auf der 5. DKD-Vorstandssitzung), sondern nur vom jeweiligen Fachausschuss und der Geschäftsstelle.

Dieser Bericht wurde im Auftrag des DKD-Fachausschusses „Strömungsmessgrößen“ von der Arbeitsgruppe „Strömungsgeschwindigkeit“ erstellt.

Auswertung: Dr. Harald Müller, PTB Braunschweig  
 Organisation: Dr. Arne Taube, Höntzsch GmbH Waiblingen  
 Teilnehmer am DKD-Ringvergleich (siehe Abschnitt 3, Tabelle 1 - Ansprechpartner)

	<b>Nationaler DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190424">https://doi.org/10.7795/550.20190424</a>	DKD-V 11-1	
		Ausgabe:	05/2019
		Revision:	0
		Seite:	5 / 25

## Abkürzungen

DAkKS	Deutsche Akkreditierungsstelle
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKD	Deutscher Kalibrierdienst
KBS	Konformitätsbewertungsstelle (Kalibrierstelle, Kalibrierlaboratorium)
MU	Messunsicherheit
LDA	Laser Doppler Anemometry
MW	Mittelwert (arithmetisches Mittel)
CMC	Calibration and Measurement Capability, vormals auch BMC genannt
BMC	Best Measurement Capability
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Stabw	Standardabweichung
rel.	relative
<i>En</i>	normierte Abweichung

## Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Informationen über den Ringvergleich.....	7
2	Messbereich.....	7
3	Teilnehmer und Zeitplan.....	7
4	TransfERNormal.....	9
5	Stabilität des TransfERNormals.....	10
6	Messergebnisse.....	10
7	Auswertung.....	11
7.1	Vorgehensweise zur Bestimmung der Ringvergleichsreferenzwerte und der Vergleichbarkeit der Messergebnisse der Kalibrierlaboratorien.....	11
7.2	Ringvergleichs-Referenzwerte.....	13
7.3	Vergleichbarkeiten.....	14
8	Bewertung des Ringvergleichs.....	15
9	Ausblick auf zukünftige Ringvergleichsmessungen.....	15
10	Literaturverzeichnis.....	15
A1.	Höntzsch: Prüfstand und Kalibrierverfahren.....	16
A2.	Testo Industrial Services: Prüfstand und Kalibrierverfahren.....	17
A3.	AIRFOLW Lufttechnik GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren.....	18
A4.	Westenberg Engineering: Prüfstand und Kalibrierverfahren.....	19
A5.	PTB: Prüfstand und Kalibrierverfahren.....	20
A6.	Deutsche WindGuard: Prüfstand und Kalibrierverfahren.....	21
A7.	UL International GmbH DEWI: Prüfstand und Kalibrierverfahren.....	22
A8.	WIND-consult: Prüfstand und Kalibrierverfahren.....	23
A9.	G. Lufft Mess- u. Regeltechnik GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren.....	24

	<b>Nationaler DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190424">https://doi.org/10.7795/550.20190424</a>	DKD-V 11-1	
		Ausgabe:	05/2019
		Revision:	0
		Seite:	7 / 25

## 1 Allgemeine Informationen über den Ringvergleich

Auf der Sitzung des DKD-Fachausschusses „Strömungsmessgrößen“ am 03.07.2014 wurde beschlossen, einen DKD-Ringvergleich für die Messgröße Strömungsgeschwindigkeit durchzuführen.

Zur Überprüfung der Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse der einzelnen Kalibrierlaboratorien mit unterschiedlichen Kalibriereinrichtungen und Verfahren wurde als TransfERNormal ein Prandtl'sches Staurohr mit Auswerteeinheit gewählt, das aufgrund minimaler Rückwirkungen in den Strömungsfeldern der Messeinrichtungen optimale Voraussetzungen für Vergleichsmessungen mit zu erwartenden möglichst kleinen Messabweichungen bietet.

Die Vergleichsmessungen wurden als Ringvergleich zwischen 8 Kalibrierlaboratorien und der PTB durchgeführt. Dabei wurde das als TransfERNormal verwendete Messsystem von der Westenberg Engineering GmbH bereitgestellt. Die Rückführung der Sensoren für Temperatur, Feuchte und Druck erfolgte durch das akkreditierte Kalibrierlaboratorium „G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH“. Der zeitliche Ablaufplan wurde vom Kalibrierlaboratorium „Hötzsch GmbH“ erstellt. Die Teilnehmer erhielten nach dem vorgegebenen Ablaufplan, das zu messende Messsystem. Jeder Teilnehmer hatte nach einer Bearbeitungszeit von maximal 3 Wochen das Messsystem auf eigene Kosten an den jeweils folgenden Teilnehmer weiterzuleiten.

Die Kalibrierergebnisse wurden in Kalibrierscheinen dokumentiert und der PTB zur Auswertung des Ringvergleichs gesandt.

## 2 Messbereich

Zur Abdeckung eines möglichst großen Strömungsgeschwindigkeitsbereichs wurden für das Prandtl'sche Staurohr mit Blick auf möglichst geringe Messunsicherheiten Kalibrierpunkte beginnend von 5 m/s bis 50 m/s festgelegt.

Sofern seitens der jeweiligen Akkreditierungsumfänge möglich, sollten die Kalibrierpunkte:

5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s

und ggf. die weiteren Punkte:

35 m/s, 50 m/s

in die Vergleichsmessungen einbezogen werden.

## 3 Teilnehmer und Zeitplan

Teilnehmer am DKD-Ringvergleich waren alle zum Zeitpunkt der Ringvergleichsmessung DAkkS-akkreditierten KBS für die Messgröße Strömungsgeschwindigkeit von Gasen mit ihren jeweiligen Kalibriermöglichkeiten.

Die Teilnehmerliste und der zeitliche Ablauf zur durchgeführten Ringvergleichsmessung ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

	<b>Nationaler DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190424">https://doi.org/10.7795/550.20190424</a>	DKD-V 11-1	
		Ausgabe:	05/2019
		Revision:	0
		Seite:	8 / 25

<b>Ansprechpartner</b>	<b>Labor</b>	<b>Adresse</b>	<b>Akkreditierung</b>	<b>Datum</b>
Helmut Hager Tel.: 0711-51822-75 helmut.hager@lufft.de	G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH	Gutenbergstr. 20 70736 Fellbach	D-K-15202-01-00	10.03.2015
Arne Taube Tel.: 07151-1716-38 arne.taube@hoentzsch.com	Höntzsch GmbH	Gottlieb-Daimler-Straße 37 71334 Waiblingen	D-K-18674-01-00	12.03.2015
Eugen Sander Tel.: 07661-90901-8412 ESander@testotis.de	Testo industrial services GmbH	Gewerbestr. 3 79199 Kirchzarten	D-K-15070-01-05	30.03.2015
Rainer Mock Tel.: 02226-9205-50 rainer.mock@airflow.de	Airflow Lufttechnik GmbH	Kleine Heeg 21 53359 Rheinbach	D-K-19557-01-00	22.04.2015
John B. Westenberg Tel.: 0221-95832-32 info@westenberg-engineering.de	Westenberg Engineering	Vitalisstr. 100 50827 Köln	D-K-18193-01-00	05.05.2015
Harald Mueller Tel.: 0531-592-1310 Harald.Mueller@ptb.de	Physikalisch-Technische Bundesanstalt	Fachbereich 1.4 Bundesallee 100 38116 Braunschweig	PTB	21.05.2015
Peter Busche Tel.: 04451-9515-239 p.busche@windguard.de	Deutsche WindGuard GmbH	Oldenburger Str. 65 D-26316 Varel	D-K-18020-01-00 D-K-15140-01-00	02.07.2015
Harald Mellinghoff oder Olaf Haack Tel.: 04421-4808-850 (Mellinghoff) -827 (Haack) H.Mellinghoff@dewi.de	UL International GmbH DEWI	Ebertstraße 96 26382 Wilhelmshaven	D-K-11095-01-00	10.06.2015
Dietmar Wüstenberg Tel.: 038203-50725 dietmar.wuestenberg@wind-consult.de	WIND-consult Ingenieurgesellschaft für umweltschonende Energiewandlung mbH	Reuterstraße 9 18211 Admannshagen-Bargeshagen	D-K-11098-01-00	11.08.2015
Helmut Hager Tel.: 0711-51822-75 helmut.hager@lufft.de	G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH	Gutenbergstr. 20 70736 Fellbach	D-K-15202-01-00	25.09.2015

Tabelle 1: Teilnehmerliste und zeitlicher Ablauf zur DKD-Ringvergleichsmessung

#### 4 Transfernnormal

Als Transfernnormal verwendet wurde ein Messsystem, bestehend aus einem auch als Pitot-Static-Tube bezeichneten Prandtl'schen Staurohr, einem als Westi-Box bezeichneten Flow Calculation System mit Druck-, Temperatur- und Feuchtesensorik und einem Laptop zur Ausgabe der gemessenen Strömungsgeschwindigkeitswerte.

Die Transfernnormal-Ausstattung wurde von der Westenberg Engineering GmbH in einer Metallbox entsprechend Abbildung 1 bereitgestellt.

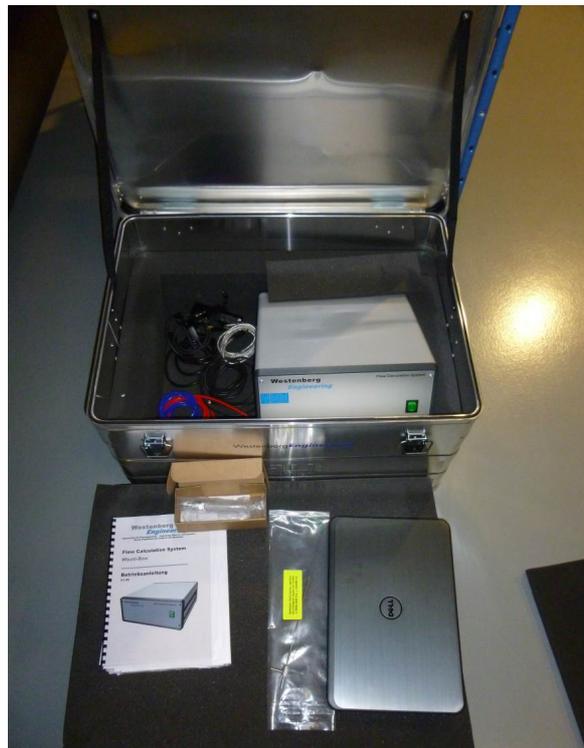


Abbildung 1: Inhalt Ringvergleichs-Equipment bereitgestellt von der Fa. Westenberg.

Westi-Box (WB) SN 0000-0000-0046 für Ringvergleich Strömung:

- Metallbox Westenberg Engineering
- Laptop Fa. Dell mit Software und Ladegerät
- Westi-Box (WB) Flow Calculation System mit
  - Anschlusskabel,
  - USB-Verbindungskabel zum Laptop
  - Betriebsanleitung,
  - DAkKS-KS Umgebungsdruck
- Temperatur/Feuchtefühler #KPC2.S/5 S/N: 146226 mit
  - Verbindungskabel zu WB und
  - DAkKS-KS Temperatur & Feuchtefühler
- Pitot-Rohr AFLPS 588701 (2.3 mm x 4 mm DIA x 300 mm LG) mit
  - Druckschläuchen (rot + blau)
- Kurzbeschreibung „Ringvergleich Strömung“

## 5 Stabilität des Transfernormals

Zur Stabilität des Transfernormals wurden von der G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH zu Beginn und am Ende der Ringvergleichsmessungen sowohl Kalibrierungen der Temperatur-, Feuchte- und Absolutdruck-Sensoren des Messsystems als auch die Messungen mit dem Transfernormal-Gesamtsystem bestehend aus Prandtl-Rohr und Sensor- und Auswerteeinheit an allen vorgesehenen Kalibrierpunkten durchgeführt.

Insbesondere der Vergleich der Messergebnisse des Transfernormal-Gesamtsystems am Anfang und am Ende des Ringvergleichs zeigt, dass für die Auswertung der Ringvergleichsmessung Driften und Instabilitäten des Transfernormals vernachlässigt werden können.

So liegen die von der G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH festgestellten Abweichungen zwischen den Messungen am Anfang und Ende des Ringvergleichs für alle Geschwindigkeitswerte unter 0,2%, sind vergleichbar mit denen direkt nacheinander durchgeführter Messreihen bei der Deutschen WindGuard WindTunnel GmbH und deutlich unter den kleinsten angebbaren Messunsicherheiten der Ringvergleichsteilnehmer.

## 6 Messergebnisse

Die von den einzelnen Kalibrierlaboratorien (T1, ..., T9) übermittelten Messergebnisse sind als Quotienten  $x_i = (\text{Referenzwert}_{\text{Lab},i} / \text{Anzeigewert}_{\text{Prüfling,Westibox}})$  mit den aus den Kalibrierscheinen zugeordneten Messunsicherheiten  $U_{k=2}$  in Tabelle 2 dargestellt.

	$v = 5 \text{ m/s}$	$v = 10 \text{ m/s}$	$v = 15 \text{ m/s}$	$v = 20 \text{ m/s}$	$v = 35 \text{ m/s}$	$v = 50 \text{ m/s}$
	$x_i$	$x_i$	$x_i$	$x_i$	$x_i$	$x_i$
T1	1,0040	1,0059	1,0033	1,0040	1,0025	1,0008
T2	0,9980	1,0044	1,0055	1,0041	1,0046	1,0065
T3	1,0020	1,0020	1,0013	1,0005	1,0009	1,0006
T4	1,0040	1,0001	0,9956	0,9964	1,0005	
T5	1,0054	1,0070	1,0050	1,0050	1,0059	1,0036
T6	1,0038	1,0053	1,0022			
T7	1,0063	1,0071	1,0048	1,0057	1,0068	
T8	1,0061	1,0077	1,0019	1,0023		
T9	1,0113	1,0104	1,0088	1,0074	1,0088	
	$v = 5 \text{ m/s}$	$v = 10 \text{ m/s}$	$v = 15 \text{ m/s}$	$v = 20 \text{ m/s}$	$v = 35 \text{ m/s}$	$v = 50 \text{ m/s}$
	$U (k=2)$	$U (k=2)$	$U (k=2)$	$U (k=2)$	$U (k=2)$	$U (k=2)$
T1	0,0079	0,0069	0,0072	0,0074	0,0076	0,0095
T2	0,0052	0,0051	0,0050	0,0050	0,0051	0,0050
T3	0,0060	0,0050	0,0053	0,0050	0,0051	0,0050
T4	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	
T5	0,0045	0,0040	0,0038	0,0037	0,0036	0,0036
T6	0,0201	0,0099	0,0065			
T7	0,0101	0,0050	0,0034	0,0050	0,0030	
T8	0,0201	0,0101	0,0066	0,0050		
T9	0,0056	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	

Tabelle 2: Messergebnisse aus dem DKD-Ringvergleich

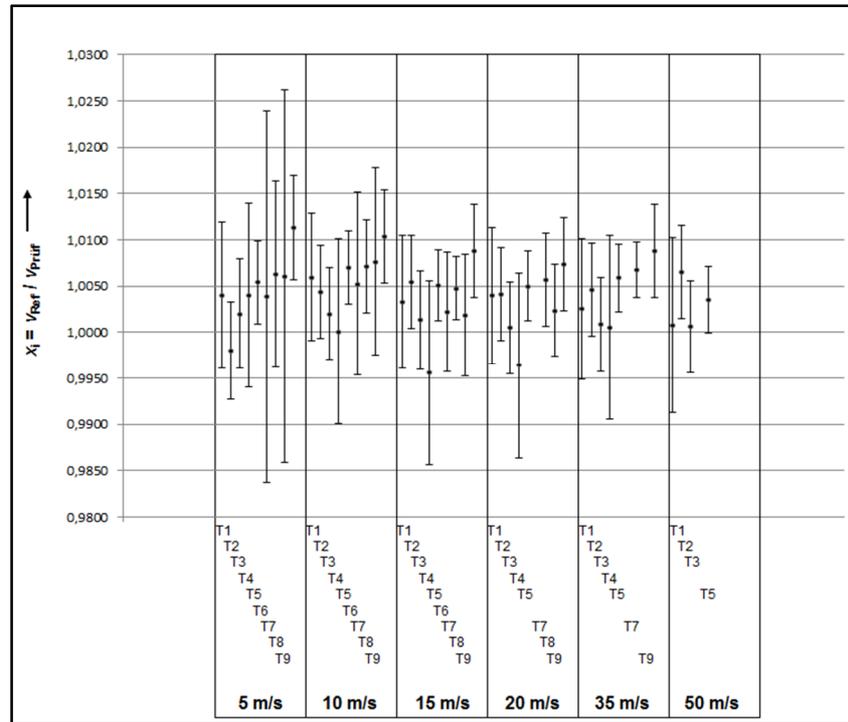


Diagramm 1: Darstellung der Messergebnisse

## 7 Auswertung

### 7.1 Vorgehensweise zur Bestimmung der Ringvergleichsreferenzwerte und der Vergleichbarkeit der Messergebnisse der Kalibrierlaboratorien

Die Ringvergleichsreferenzwerte  $x_{i,RV}$  werden für jeden Geschwindigkeitswert einzeln bestimmt, die Berechnung der einzelnen Referenzwerte erfolgt nach der Methode A von Cox<sup>[1]</sup>.

Die Referenzwerte  $x_{i,RV}$  werden als gewichtete Mittelwerte wie folgt bestimmt:

$$x_{i,RV} = \frac{\frac{x_1}{u_{x1}^2} + \frac{x_2}{u_{x2}^2} + \dots + \frac{x_n}{u_{xn}^2}}{\frac{1}{u_{x1}^2} + \frac{1}{u_{x2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{xn}^2}}, \quad (1)$$

mit  $x_1, x_2, \dots, x_n$  Messergebnisse der Kalibrierlaboratorien 1, 2, .....n  
 $u_{x1}, u_{x2}, \dots, u_{xn}$  Standardmessunsicherheiten der Laboratorien 1, 2, .....n  
 (nicht erweiterte Messunsicherheiten  $k = 2$ )

	<b>Nationaler DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190424">https://doi.org/10.7795/550.20190424</a>	DKD-V 11-1	
		Ausgabe:	05/2019
		Revision:	0
		Seite:	12 / 25

Die Standardmessunsicherheiten der Referenzwerte  $u_{x_i, KCRV}$  sind gegeben durch:

$$\frac{1}{u_{x_i, RV}^2} = \frac{1}{u_1^2} + \frac{1}{u_2^2} + \dots + \frac{1}{u_n^2} \quad (2)$$

und deren erweiterte Messunsicherheit des Referenzwerts  $U(x_i, RV)$  durch:

$$U(x_i, RV) = 2u_{x_i, RV} \quad (3)$$

Zur Überprüfung der Kompatibilität der Messergebnisse wird für jeden Geschwindigkeitswert ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt. Zunächst wird die Prüfgröße  $\chi_{obs}^2$  berechnet:

$$\chi_{obs}^2 = \frac{(x_1 - x_{i, RV})^2}{u_{x1}^2} + \frac{(x_2 - x_{i, RV})^2}{u_{x2}^2} + \dots + \frac{(x_n - x_{i, RV})^2}{u_{xn}^2} \quad (4)$$

Der Freiheitsgrad ist durch  $n - 1$  mit  $n$  als Anzahl der berücksichtigten Labore gegeben. Der Chi-Quadrat-Test gilt als nicht bestanden, falls:

$$Pr\{\chi_v^2 > \chi_{obs}^2\} < 0,05. \quad (5)$$

(Genutzt wird die Funktion  $CHIINV(0,05;n)$  in MS Excel. Der Test ist nicht bestanden, falls  $CHIINV(0,05;n) < \chi_{obs}^2$ )

Ist die Kompatibilität gegeben, so kann der Wert  $x_{i, RV}$  als Ringvergleichsreferenzwert und  $U(x_{i, RV})$  als erweiterte Unsicherheit des Ringvergleichsreferenzwerts gewertet werden. Bei Nichterfüllung des Testkriteriums ist das Messergebnis des Laboratoriums mit dem höchsten Wert von

$$\frac{(x_i - x_{i, RV})^2}{u_{xi}^2} \quad (6)$$

auszuschließen, erneut ein Referenzwert mit neuer Standardmessunsicherheit zu bestimmen und der Chi-Quadrat-Test durchzuführen. Diese Prozedur wird so oft wiederholt bis das Testkriterium erfüllt ist. (Siehe hierzu Tabelle 3: Chi-Quadrat-Test!)

Ist der Chi-Quadrat-Test erfüllt, wird für jedes Messergebnis  $x_i$  die Abweichung  $d_i$  zwischen jedem Labor und dem Ringvergleichsreferenzwert  $x_{i, KCRV}$ :

$$d_i = x_i - x_{i, RV} \quad (7)$$

sowie

$$U(d_i) = 2 * \sqrt{u_{xi}^2 - u_{xi, RV}^2} \quad (8)$$

berechnet. Eine Nichtvergleichbarkeit zum Ringvergleichsreferenzwert liegt vor falls

$$U(d_i) < |d_i|. \tag{9}$$

Die Überprüfung der Vergleichbarkeit der Messergebnisse der Kalibrierlaboratorien untereinander erfolgt entsprechend:

$$d_{i,j} = x_i - x_j \text{ und } U(d_{ij}) = 2 \cdot u(d_{ij}) \text{ mit } u^2(d_{ij}) = u^2(x_i) + u^2(x_j) \tag{10}$$

Eine Vergleichbarkeit ist nicht gegeben, falls:

$$U_{ij} < d_{ij}. \tag{11}$$

Obige Angaben sind gleichbedeutend mit denen des gebräuchlichen  $E_n$ -Kriteriums

$$E_i = \frac{d_i}{U(d_i)} \tag{12}$$

mit  $|E_i| \leq 1$  im Falle der Vergleichbarkeit und  $|E_i| > 1$  andernfalls.

## 7.2 Ringvergleichs-Referenzwerte

Die Tabelle 3 zeigt das Ergebnis des Chi-Quadrat-Tests nach 7.1 mit den Messergebnissen der Ringvergleichsteilnehmer nach Tabelle 2.

v (m/s)	T1 chi sgr	T2 chi sgr	T3 chi sgr	T4 chi sgr	T5 chi sgr	T6 chi sgr	T7 chi sgr	T8 chi sgr	T9 chi sgr	sum chi sgr	n	CHIINV(0,05;n-1)	erfüllt
5	0,191	0,588	1,551	0,113	0,016	0,034	0,015	0,001	4,041	6,551	9	15,510	☹
10	0,006	0,135	2,824	1,491	0,152	0,037	0,129	0,082	2,763	7,619	9	15,510	☹
15	0,069	0,141	1,203	2,976	0,176	0,387	0,095	0,524	3,316	8,887	9	15,510	☹
20	0,000	0,004	1,964	2,293	0,305		0,472	0,436	1,842	7,316	8	14,070	☹
35	0,590	0,118	3,244	0,975	0,054		0,743		1,784	7,507	7	12,590	☹
50	0,296	1,557	1,215		0,011					3,079	4	7,810	☹

Tabelle 3: Chi-Quadrat-Test, die Kompatibilität der Messergebnisse war bereits im ersten Schritt ohne den Ausschluss von Messdaten gegeben.

Man erhält bereits im ersten Schritt ohne Ausschluss von Messdaten einen konsistenten Datensatz für alle Geschwindigkeitswerte und beteiligten Kalibrierlaboratorien. Somit ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten Ringvergleichs-Referenzwerte (**RV**) mit den zugeordneten Messunsicherheiten.

v (m/s)	T1		T2		T3		T4		T5		T6		T7		T8		T9		RV	
	$x_i$	$U(k=2)$																		
5	1,0040	0,0079	0,9980	0,0052	1,0020	0,0060	1,0040	0,0100	1,0054	0,0045	1,0038	0,0201	1,0063	0,0101	1,0061	0,0201	1,0113	0,0056	1,0057	0,0026
10	1,0059	0,0069	1,0044	0,0051	1,0020	0,0050	1,0001	0,0100	1,0070	0,0040	1,0053	0,0099	1,0071	0,0050	1,0077	0,0101	1,0104	0,0050	1,0062	0,0020
15	1,0033	0,0072	1,0055	0,0050	1,0013	0,0053	0,9956	0,0100	1,0050	0,0038	1,0022	0,0065	1,0048	0,0033	1,0019	0,0066	1,0088	0,0050	1,0042	0,0017
20	1,0040	0,0074	1,0041	0,0050	1,0005	0,0050	0,9964	0,0100	1,0050	0,0037			1,0057	0,0050	1,0023	0,0050	1,0074	0,0050	1,0040	0,0018
35	1,0025	0,0076	1,0046	0,0051	1,0009	0,0051	1,0005	0,0100	1,0059	0,0036			1,0068	0,0030			1,0088	0,0050	1,0055	0,0017
50	1,0008	0,0095	1,0065	0,0050	1,0006	0,0050			1,0036	0,0036									1,0034	0,0024

Tabelle 4: Messergebnisse und resultierende Ringvergleichs-Referenzwerte einschließlich erweiterter Messunsicherheiten

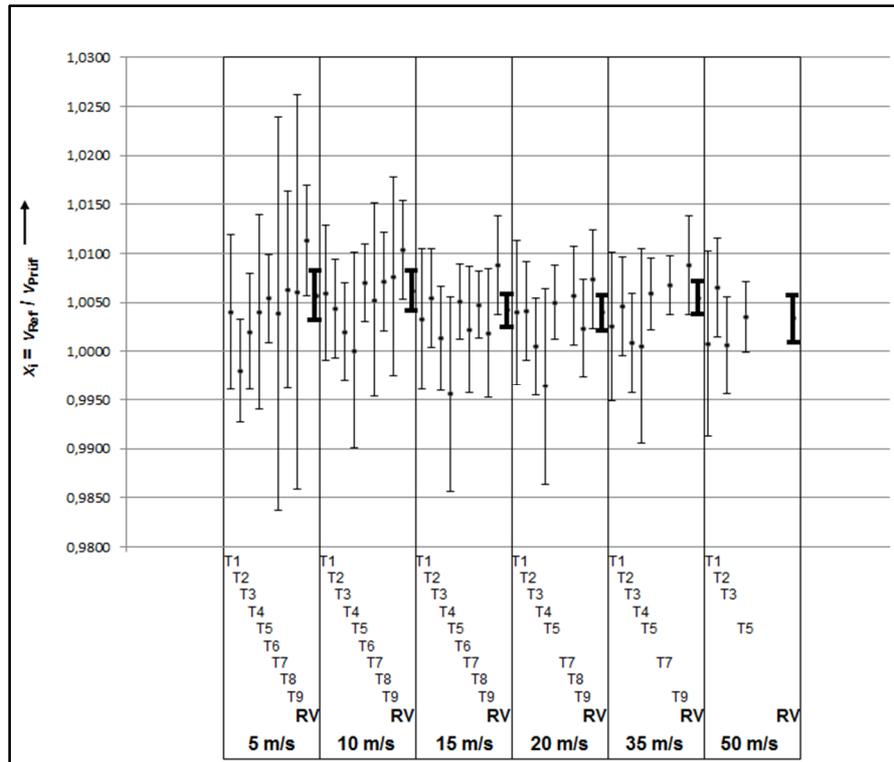


Diagramm 2: Darstellung der Messergebnisse mit resultierendem Ringvergleichs-Referenzwert

### 7.3 Vergleichbarkeiten

Vergleichbarkeit der Messergebnisse der Ringvergleichsteilnehmer mit dem Ringvergleichs-Referenzwert, rot markiert sind **Nichtvergleichbarkeiten, falls  $U(d_i) < |d_i|$** .

v (m/s)	T1		T2		T3		T4		T5		T6		T7		T8		T9	
	$ d_i  =  x_i - x_{i,RV} $	$U(d_i)$	$ d_i  =  x_i - x_{i,RV} $	$U(d_i)$	$ d_i  =  x_i - x_{i,RV} $	$U(d_i)$	$ d_i  =  x_i - x_{i,RV} $	$U(d_i)$	$ d_i  =  x_i - x_{i,RV} $	$U(d_i)$	$ d_i  =  x_i - x_{i,RV} $	$U(d_i)$	$ d_i  =  x_i - x_{i,RV} $	$U(d_i)$	$ d_i  =  x_i - x_{i,RV} $	$U(d_i)$	$ d_i  =  x_i - x_{i,RV} $	$U(d_i)$
5	0,0017	0,0075	0,0077	0,0046	0,0037	0,0054	0,0017	0,0097	0,0003	0,0037	0,0019	0,0199	0,0006	0,0098	0,0004	0,0200	0,0056	0,0050
10	0,0003	0,0066	0,0018	0,0046	0,0042	0,0046	0,0061	0,0098	0,0008	0,0034	0,0009	0,0097	0,0009	0,0045	0,0015	0,0099	0,0042	0,0046
15	0,0009	0,0070	0,0012	0,0047	0,0029	0,0050	0,0086	0,0098	0,0008	0,0034	0,0020	0,0063	0,0005	0,0029	0,0024	0,0064	0,0046	0,0047
20	0,0000	0,0072	0,0002	0,0047	0,0035	0,0046	0,0076	0,0098	0,0010	0,0033			0,0017	0,0046	0,0016	0,0046	0,0034	0,0047
35	0,0029	0,0074	0,0009	0,0048	0,0046	0,0048	0,0049	0,0098	0,0004	0,0032			0,0013	0,0024			0,0033	0,0047
50	0,0026	0,0091	0,0031	0,0044	0,0028	0,0044			0,0002	0,0026								

Tabelle 5: Vergleichbarkeiten mit dem Ringvergleichs-Referenzwert.

Alternativ zu Tabelle 5 sind in der Tabelle 6 die Vergleichbarkeiten der für die jeweiligen Geschwindigkeitswerte erhaltenen Messergebnisse der einzelnen Teilnehmer zum Ringvergleichsreferenzwert anhand der  $E_n$ -Werte aufgelistet, wobei für die Werte  $|E_n| \leq 1$  eine Vergleichbarkeit mit dem Ringvergleichs-Referenzwert gegeben ist.

v (m/s)	$ E_{n1} $ (T1)	$ E_{n1} $ (T2)	$ E_{n1} $ (T3)	$ E_{n1} $ (T4)	$ E_{n1} $ (T5)	$ E_{n1} $ (T6)	$ E_{n1} $ (T7)	$ E_{n1} $ (T8)	$ E_{n1} $ (T9)
5	0,23	1,69	0,69	0,17	0,08	0,09	0,06	0,02	1,13
10	0,04	0,39	0,92	0,62	0,23	0,10	0,20	0,15	0,91
15	0,14	0,26	0,58	0,88	0,24	0,32	0,18	0,38	0,97
20	0,00	0,03	0,75	0,77	0,32		0,37	0,35	0,73
35	0,39	0,18	0,96	0,50	0,13		0,53		0,71
50	0,28	0,71	0,63		0,07				

Tabelle 6: Vergleichbarkeit der Messergebnisse der Teilnehmer (T1, ..., T9) mit den für die jeweiligen Geschwindigkeitswerte bestimmten Ringvergleichs-Referenzwerten. Grün unterlegt sind Werte mit  $|E_{n1}| \leq 1$ , rot die Werte mit  $|E_{n1}| > 1$ .

## 8 Bewertung des Ringvergleichs

Der Ringvergleich wurde von den Mitgliedern des Fachausschusses Strömungsmessgrößen für die Messgröße Strömungsgeschwindigkeit so geplant und durchgeführt, dass mit der Transfornormalmesseinrichtung bestehend aus einem Prandtl'schen Staurohr mit beige-stellter Sensorik und Auswerteeinheit bei möglichst kleinen Rückwirkungen in den einzelnen Messeinrichtungen ein möglichst großer Strömungsgeschwindigkeitsbereich von 5 m/s bis 50 m/s abgedeckt werden konnte.

Das Gesamtergebnis über 6 Geschwindigkeitswerte mit 46 Messwerten zeigt eine gute Übereinstimmung aller Messergebnisse, lediglich bei zwei von neun Teilnehmern wurde bei jeweils einem Geschwindigkeitswert der  $E_n$ -Wert von 1 überschritten. Insgesamt bestehen somit bei lediglich ca. 4 % aller Messergebnisse Abweichungen, die im Einzelnen zu analysieren aber nicht überzubewerten sind, da zum einen in einem konsistenten Datensatz mit 95% Überdeckungswahrscheinlichkeit ohnehin 5 % Ausreißer zu erwarten sind und zum andern unterschiedliche Kalibriereinrichtungen und Kalibrierverfahren eingesetzt wurden und derzeit noch keine Richtlinien und Normen für Staurohrkalibrierungen vorliegen.

## 9 Ausblick auf zukünftige Ringvergleichsmessungen

1. Mechanisches Anemometer (bspw. Flügelrad), um die Unterschiede resultierend aus einem in die Strömung eingebrachten Prüfling zu bewerten.
2. Pitot-Staurohr solo mit Differenzdruckmessung durch Labor
3. Anschaffung eines DKD-LDAs für Ringvergleiche aller Laboratorien im vollen Geschwindigkeitsbereich 0,2...70 m/s
4. Aufnahme weiterer (internationaler) Partner in einer neuen Runde mit zusätzlichen Messungen.

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] ISO Guide 98-3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) 2008, ISO, Geneva, CH
- [2] DIN 1319-4: Grundlagen der Meßtechnik Teil 4: Auswertung von Messungen, Meßunsicherheit, Beuth-Verlag Berlin, 1999
- [3] COX M.G., The evaluation of key comparison data, Metrologia (39), pp 589-595, 2002
- [4] H. Müller, N. Pape, T. Sodomann, J. Kampe und D. Dopheide. Einsatz der Laser-Doppler-Anemometrie für die Kalibrierung von Anemometern in Windkanälen. In Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Braunschweig, Germany, September 2006.

## A1. Höntzsch: Prüfstand und Kalibrierverfahren

### A1.1. Freistrahli-Windkanal (WK320) der Höntzsch GmbH

Der Freistrahli-Windkanal (WK320) der Höntzsch GmbH ist ein Kanal gemäß „Göttinger-Bauart“ (Typ 83260 G). Konstruiert und gefertigt wurde er durch die Fa. Westenberg Engineering. Die Strömungsgeschwindigkeit kann stufenlos im Bereich 0,1 bis 70 m/s geregelt werden. Der Düsenaustrittsdurchmesser beträgt 320 mm bei einem Kontraktionsverhältnis von 8. Die Messstrecke ist 468 mm lang und der Turbulenzgrad liegt zwischen 0,5...0,8 %. Der Aufbau ist horizontal mit den Dimensionen: Höhe 1650 mm, Breite 3100 mm, Länge 7100 mm.

Bei der Höntzsch GmbH kommt ein LDA-System der Fa. ILA (Intelligent Laser Applications GmbH) als Referenz zur Anwendung, welches in sog. Rückstreuanordnung im Bereich von 0,1 bis 70 m/s eingesetzt werden kann und von der PTB hinsichtlich des Interferenzstreifenabstands als LDA-Kalibrierkonstante mit einer Messunsicherheit  $U_{k=2}$  von ca.  $\pm 0,14$  % kalibriert wurde. Der Messpunkt liegt 35 mm vom Düsenaustritt und 60 mm oberhalb und 55 mm abseits der Strahlachse. Hier werden jeweils 200 Bursts pro Geschwindigkeit aufgenommen.

### A1.2. Kalibrierverfahren

Das Pitot-Rohr ist mit seiner Mitte zwischen Staudruckspitze und statischen Druckbohrungen auf  $x = 233$  mm, dem Prüflings-Messpunkt, positioniert. Der an die Westi-Box angeschlossene Temperatur- und Feuchtesensor wurde in der Nähe der Messkammer platziert.

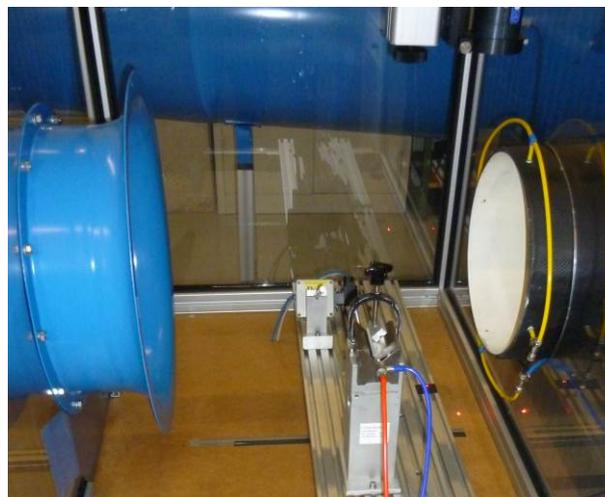


Abbildung A.1: Staurohr in Messkammer. Das LDA ist im Bild oben rechts.

Die Strömungsgeschwindigkeit wird einerseits mit dem Kalibriergegenstand und andererseits mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) gemessen. Die Kalibrierposition des Sensor Kopfes im Windkanal ist 233 mm vom Düsenaustritt entfernt in der Strahlmitte.

Aus 10 hintereinander im Abstand von 10 Sekunden abgelesenen Messwerten des Prüflings werden die erweiterte Standardmessunsicherheit und der Mittelwert errechnet. Dieser Mittelwert wird mit der vom LDA bestimmten Geschwindigkeit, die mittels Windkanal-Korrekturfaktoren<sup>1</sup> auf die Prüflingsposition umgerechnet wird, verglichen.

<sup>1</sup> H. Müller, N. Pape, T. Sodomann, J. Kampe und D. Dopheide. Einsatz der Laser-Doppler-Anemometrie für die Kalibrierung von Anemometern in Windkanälen. In Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Braunschweig, Germany, September 2006.

	<b>Nationaler DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190424">https://doi.org/10.7795/550.20190424</a>	DKD-V 11-1	
		Ausgabe:	05/2019
		Revision:	0
		Seite:	17 / 25

## A2. Testo Industrial Services: Prüfstand und Kalibrierverfahren

### A2.1. Freistrahli-Windkanal (WK832060) der Testo Industrial Services GmbH

Der Freistrahli-Windkanal (WK832060) der Testo Industrial Services GmbH ist ein Kanal gemäß „Göttinger-Bauart“ (Typ 832060 G). Konstruiert und gefertigt wurde er durch die Fa. Westenberg Engineering. Die Strömungsgeschwindigkeit kann stufenlos im Bereich 0,1 m/s bis 68 m/s geregelt werden. Der Düsenaustrittsdurchmesser beträgt 320 mm bei einem Kontraktionsverhältnis von 8. Die Messstrecke ist 470 mm lang und der Turbulenzgrad liegt zwischen 0,3...0,5 % (bei 20m/s).

Der Aufbau ist horizontal mit den Dimensionen: Höhe 1530 mm, Breite 2800 mm, Länge 7040 mm.

Bei der Testo Industrial Services GmbH kommt ein LDA-System der Fa. ILA (Intelligent Laser Applications GmbH) zur Anwendung, welches in sog. Rückstreuanordnung im Bereich von 0,1 bis 68 m/s eingesetzt werden kann und von der PTB hinsichtlich des Interferenzstreifenabstands als LDA-Kalibrierkonstante mit einer Messunsicherheit  $U_{k=2}$  von ca.  $\pm 0,13$  % kalibriert wurde.

### A2.2. Kalibrierverfahren

Das Pitot-Rohr ist mit seiner Staudruckspitze im Zentrum des Freistrahls und im Abstand von der Düse  $x = 100$  mm positioniert. Der an die Westi-Box angeschlossene Temperatur- und Feuchtesensor wurde in der Nähe der Messkammer platziert.



Abbildung A2: Staurohr und Laser im Zentrum des Freistrahls.

Die Strömungsgeschwindigkeit wird einerseits mit dem Kalibriergegenstand und andererseits mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) als Referenz gemessen. Die Messungen erfolgen dabei nacheinander.

Mittels LDA werden 1000 Bursts (oder 20 Sekunden) pro Geschwindigkeit aufgenommen. Anschließend wird der Prüfling positioniert und aus 10 hintereinander im Abstand von 5 Sekunden abgelesenen Messwerten des Prüflings dessen erweiterte Standardmessunsicherheit und der Mittelwert errechnet. Dieser Mittelwert wird mit der vom LDA zuvor bestimmten Geschwindigkeit verglichen.

### A3. AIRFOLW Lufttechnik GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren

#### A3.1. Freistrah-Windkanal der AIRFLOW Lufttechnik GmbH

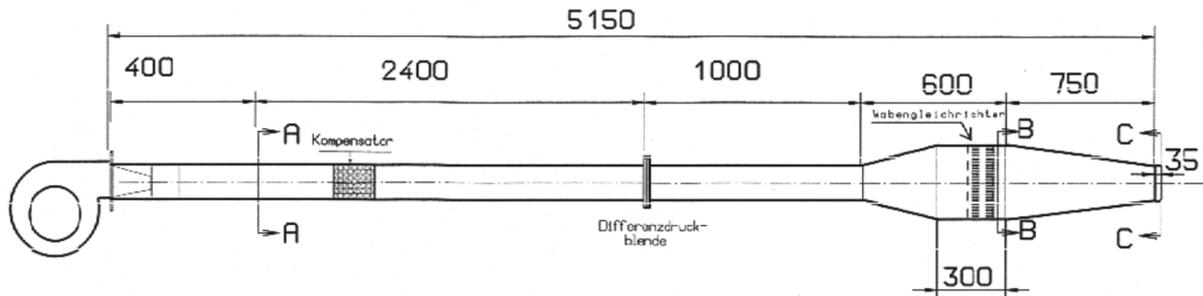


Abbildung A3.1: Abmessungen des Windkanals in mm

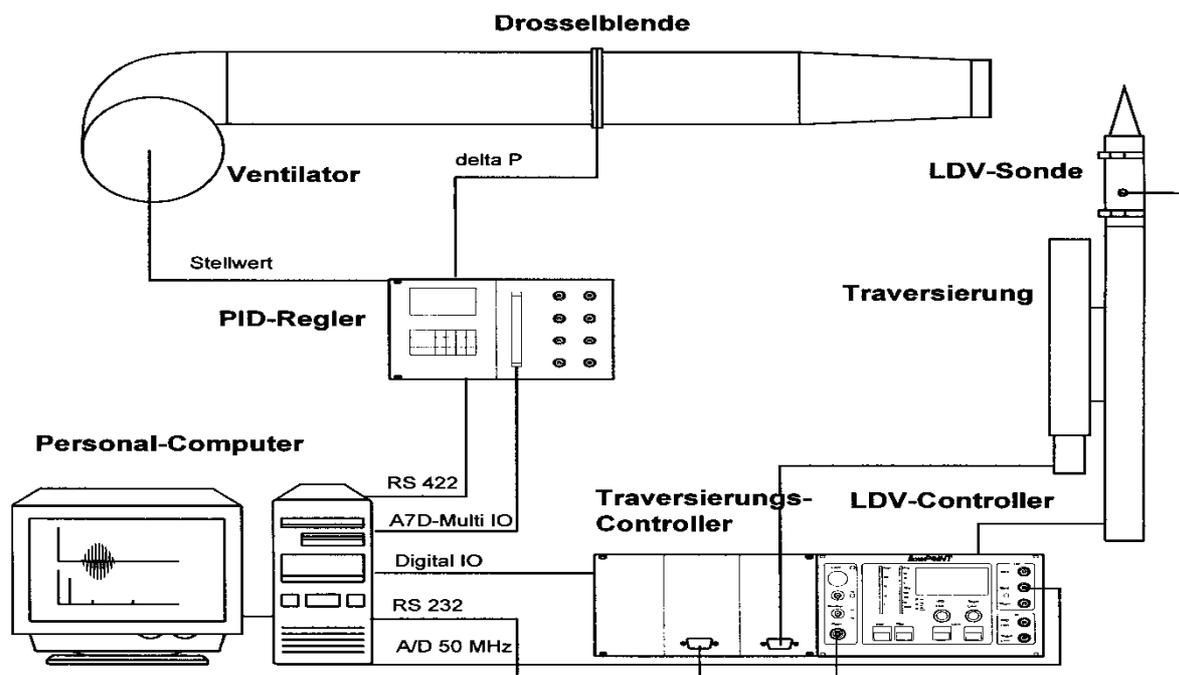


Abbildung A3.2: Schematische Darstellung der Kalibriereinrichtung

#### A3.2. Kalibrierverfahren

Es wird eine Vergleichsmessung zwischen Prüfling und Laser-Doppler-Anemometer im Zentrum eines turbulenzarmen Freistrahls (Durchmesser 150 mm) in einem Abstand von 75 mm zur Düse (Kontraktionsverhältnis 2:1), in einem Geschwindigkeitsbereich von 0,1 m/s bis 30 m/s vorgenommen. Dazu wird die gewünschte Strömungsgeschwindigkeit eingegeben und mittels PID-Regler über eine Druckregelung konstant gehalten. Sukzessive Aufnahme der Daten von Prüfling und LDA.

## A4. Westenberg Engineering: Prüfstand und Kalibrierverfahren

### A4.1. Freistrahli-Windkanal (WK255/180) von Westenberg Engineering

Der Freistrahli-Windkanal (WK255/180) von Westenberg Engineering ist ein Kanal gemäß „Göttinger-Bauart“ (Typ WK-825540-G / WK-818070-G). Konstruiert und gefertigt wurde er in eigener Regie. Die Strömungsgeschwindigkeit kann stufenlos im Bereich 0,1 m/s bis 40 m/s (WK255) bzw. 0,1 m/s bis 70 m/s (WK180) geregelt werden. Der Düsenaustrittsdurchmesser beträgt 255 mm bei einem Kontraktionsverhältnis von 4 (WK255) bzw. 180 mm bei einem Kontraktionsverhältnis von 8 (WK180). Die Messtrecke ist 320 mm (WK255) bzw. 280 mm (WK180) lang und der Turbulenzgrad liegt zwischen 0,5...0,8 %.

Der Aufbau ist horizontal mit den Dimensionen: Höhe 1400 mm, Breite 2100 mm, Länge 4100 mm.

Bei Westenberg Engineering kommt ein LDA-System der Fa. ILA (Intelligent Laser Applications GmbH) zur Anwendung, welches in sog. Rückstreuanordnung im Bereich von 0,1 m/s bis 70 m/s eingesetzt werden kann und von der PTB hinsichtlich des Interferenzstreifenabstands als LDA-Kalibrierkonstante mit einer Messunsicherheit  $U_{k=2}$  von ca.  $\pm 0,12$  % kalibriert wurde.

### A4.2. Kalibrierverfahren

Das Pitot-Rohr ist mit seiner Mitte zwischen Staudruckspitze und stationär. Druckbohrungen auf  $x = 150$  mm in der Strahlmitte, dem Prüflings-Messpunkt, positioniert. Der an die Westi-Box angeschlossene Temperatur- und Feuchtesensor wurde in der Nähe der Messkammer platziert.

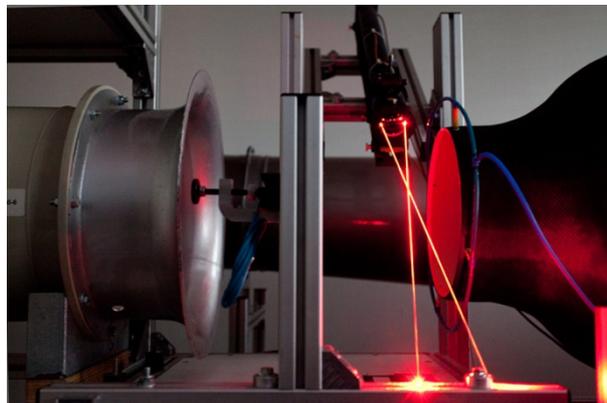


Abbildung A4: LDA-Messvolumen in der Messtrecke

Die Strömungsgeschwindigkeit wird einerseits mit dem Kalibriergegenstand und andererseits mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) gemessen. Der Austrittsdurchmesser der Düse beträgt 255 mm. Als Referenz dient ein LDA mit seinem Messpunkt 40 mm vom Düsenaustritt und 45 mm oberhalb und 45 mm abseits der Strahlachse. Hier werden jeweils 500 Bursts pro Geschwindigkeit aufgenommen. Aus 10 hintereinander im Abstand von 10 Sekunden abgelesenen Messwerten des Prüflings werden die erweiterte Standardmessunsicherheit und der Mittelwert errechnet. Dieser Mittelwert wird mit der vom LDA bestimmten Geschwindigkeit, die mittels Windkanal-Korrekturfaktoren<sup>2</sup> auf die Prüflingsposition umgerechnet wird, verglichen.

<sup>2</sup> H. Müller, N. Pape, T. Sodomann, J. Kampe und D. Dopheide. Einsatz der Laser-Doppler-Anemometrie für die Kalibrierung von Anemometern in Windkanälen. In Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Braunschweig, Germany, September 2006.

## A5. PTB: Prüfstand und Kalibrierverfahren

### A5.1. PTB-Windkanal

Der für den Ringvergleich eingesetzte PTB-Windkanal ist ein Windkanal Göttinger Bauart mit offener Messstrecke, einem Düsenaustrittsdurchmesser von 320 mm, einem Kontraktionsverhältnis von 8 und einer Messstreckenlänge von 450 mm.

Gemäß BIPM-CMC-NMI-Datenbankeintrag DE 41 wird der Windkanal für Anemometerkalibrierungen im Strömungsgeschwindigkeitsbereich von 0,5 m/s bis 65 m/s mit einer bestmöglichen erweiterten Messunsicherheit von  $(0,005 + 0,0035 v)$  m/s,  $v$  Strömungsgeschwindigkeit, eingesetzt.

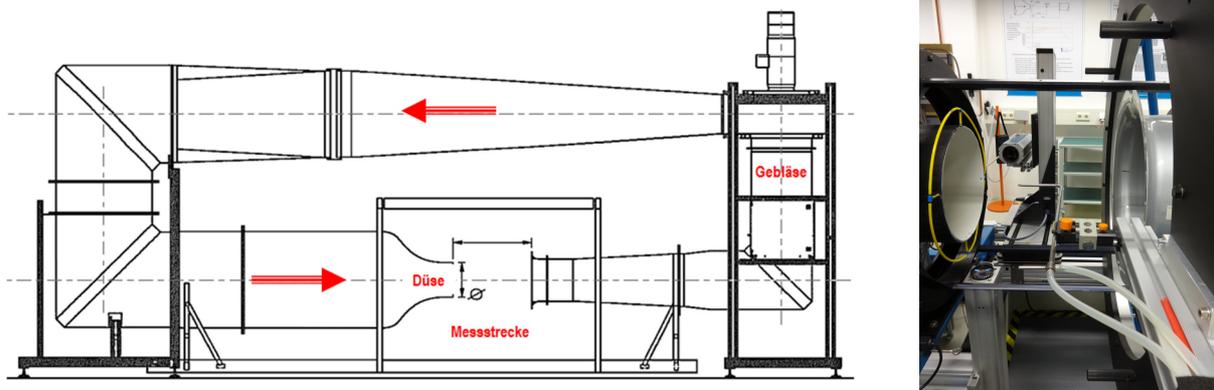


Abbildung A5: Messanordnung des PTB-Windkanals Göttinger Bauart mit 320 mm Düse

### A5.2. Kalibrierverfahren

Die Kalibrierung erfolgt für vorgegebene Strömungsgeschwindigkeitswerte durch die gleichzeitige Erfassung der Messdaten eines Laser-Doppler-Anemometers als Bezugsnormal an der Referenzposition und des Prüflings an der Prüflingsposition in der Messstrecke des Windkanals.

Die Referenzposition liegt auf der Windkanalachse 20 mm hinter der Düsenaustrittsfläche und die Prüflingsposition im Fall des rückwirkungsarmen Staurohrs, festgelegt durch die dynamische Druckbohrung an der Staurohrspitze, mittig in der Strömung, 145 mm hinter der Düsenaustrittsfläche.

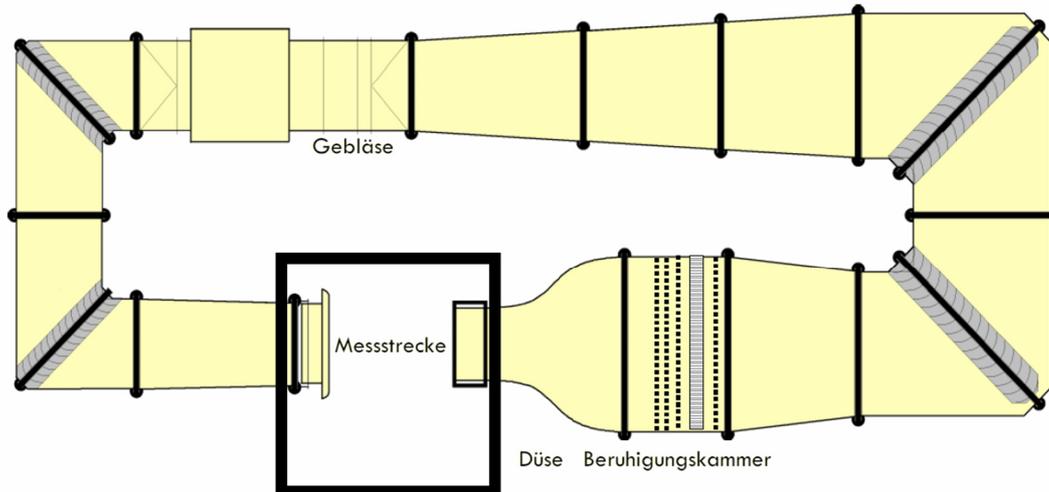
Die lokale Differenz zwischen Referenz- und Prüflingsposition ist über einen im Einzelnen bestimmten Korrekturfaktor berücksichtigt.

Die Auswertung der Messwerte erfolgt für die jeweiligen Geschwindigkeitswerte für Messdauern von jeweils einer Minute.

## A6. Deutsche WindGuard: Prüfstand und Kalibrierverfahren

### A6.1. DWG-Windkanal Varel 2

Der DWG-Windkanal Varel 2 ist ein geschlossener Niedergeschwindigkeits-Windkanal Göttinger Bauart mit halb-offener Messstrecke. Der genutzte Strömungsgeschwindigkeitsbereich für die Anemometerkalibrierung beträgt 0,5 m/s bis 38 m/s.



#### Technische Daten:

Düsenaustritt	1000 x 1000 mm
Länge der Messstrecke	1800 mm
Kontraktionsverhältnis	6 : 1
Kalibrierbereich	ca. 0.5 – 38 m/s
Gesamtlänge	38 m
Gesamthöhe	2.5 m
Turbulenzintensität	< 0.2 %



Abbildung A6: Messanordnung des DWG-Windkanals Varel 2

### A6.2. Kalibrierverfahren

Die Kalibrierung erfolgt für vorgegebene Strömungsgeschwindigkeitswerte durch die gleichzeitige Erfassung der Referenz- und Prüflingsgeschwindigkeiten für die gewählte Prüflingsposition 780 mm hinter der Düsenaustrittsfläche in der Mitte des Windkanals.

Die Referenzgeschwindigkeit wird über vier in den Ecken des Windkanals befindliche Staudrucksonden bestimmt, wobei die Ausgangssignale der Differenzdrucksensoren, die Werte für Luftdruck, Lufttemperatur und Luftfeuchte, das Prüflingsausgangssignal und das Steuersignal des Windkanals von einer Datenerfassungsanlage aufgezeichnet werden und das Gesamtsystem über ein PTB-TransfERNormal rückgeführt ist.

Durch einen Messintervall von mindestens 30 Sekunden für jeden Kalibrierwert wird eine ausreichende statistische Sicherheit erlangt.

## A7. UL International GmbH DEWI: Prüfstand und Kalibrierverfahren

### A7.1. DEWI-genutzter Windkanal

Der von DEWI genutzte akustisch optimierte Windkanal ist ein geschlossener Umlaufkanal Göttinger Bauart. Abbildung A7 zeigt den schematischen Aufbau mit Gebläseumlaufdecken, Beruhigungskammer und offener Messstrecke. Die Düsenaustrittsfläche misst 100 cm in horizontaler und 80 cm in vertikaler Richtung.

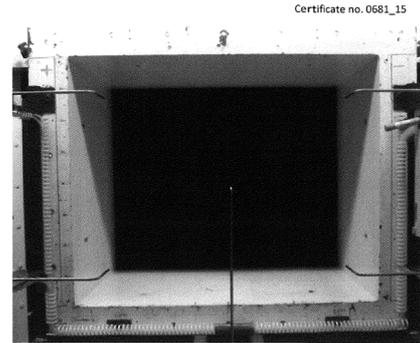
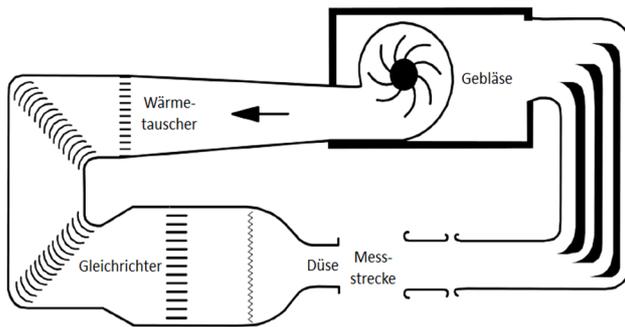


Photo showing the Pitot tube in the wind tunnel.  
 Remark: The photo does not show the real proportions, it is distorted by the lens of the camera.

Abbildung A7: Messanordnung des von DEWI genutzten Windkanals

### A7.2. Kalibrierverfahren

Das zu kalibrierende Anemometer wird an der Prüflingsposition 800 mm hinter der Düsenaustrittsfläche mittig positioniert, die Referenzgeschwindigkeit mit Hilfe von vier Staudrucksonden in den Ecken des Windkanals aus den Differenzdruckwerten und den Messdaten für Luftdruck, Lufttemperatur und Luftfeuchte bestimmt. Die Messdaten werden zusammen mit den Prüflingsdaten von einer Datenerfassungsanlage aufgezeichnet, wobei jeder Kalibrierwert aus Messwerten über eine Messdauer von mindestens 30 Sekunden ermittelt wird.

## A8. WIND-consult: Prüfstand und Kalibrierverfahren

### A8.1. WIND-consult-genutzter Windkanal

Der von WIND-consult genutzte Windkanal ist ein Unterschall-Windkanal Göttinger Bauart mit offener Messstrecke, einem Querschnitt von 1,4 m x 1,4 m, einer Länge von 2,8 m und einem Turbulenzgrad von 0,4 % im Kernstrahl von 0,5 m x 0,5 m. Der Windkanal wird vom Lehrstuhl für Meerestechnik an der Universität Rostock betrieben.

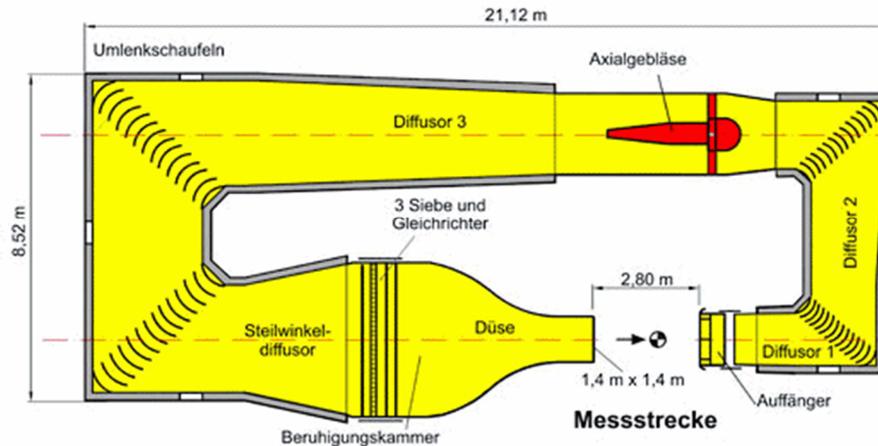


Abbildung A8: Messanordnung des von WIND-consult genutzten Windkanals

### A8.2. Kalibrierverfahren

Das zu kalibrierende Anemometer wird an der Prüflingsposition 1300 mm hinter der Düsenaustrittsfläche und 800 mm über der unteren Düsenrandmitte positioniert und die Referenzgeschwindigkeit über ein Prandtlrohr bestimmt, das im Abstand von 1120 mm von der Düsenaustrittsfläche und 1150 mm über der unteren Düsenrandmitte fixiert wird. Die Umgebungsbedingungen Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Umgebungsdruck werden am Rand der Messstrecke gemessen.

Die Erfassung der Messwerte erfolgt dabei jeweils 60 s im stabilen Geschwindigkeitsbereich eines angefahrenen Geschwindigkeitswerts.

	<b>Nationaler DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190424">https://doi.org/10.7795/550.20190424</a>	DKD-V 11-1	
		Ausgabe:	05/2019
		Revision:	0
		Seite:	24 / 25

## A9. G. Lufft Mess- u. Regeltechnik GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren

### A9.1. Luft-Windkanal

Der von Lufft eingesetzte Windkanal ist ein Windkanal Göttinger Bauart, ausgelegt für einen Geschwindigkeitsbereich von 0,1 m/s bis 55 m/s, mit einem Düsendurchmesser von 255 mm, offener Messstrecke und einem Turbulenzgrad kleiner 0,4 %.

Als Bezugsnormale dient ein Laser-Doppler-Anemometer.

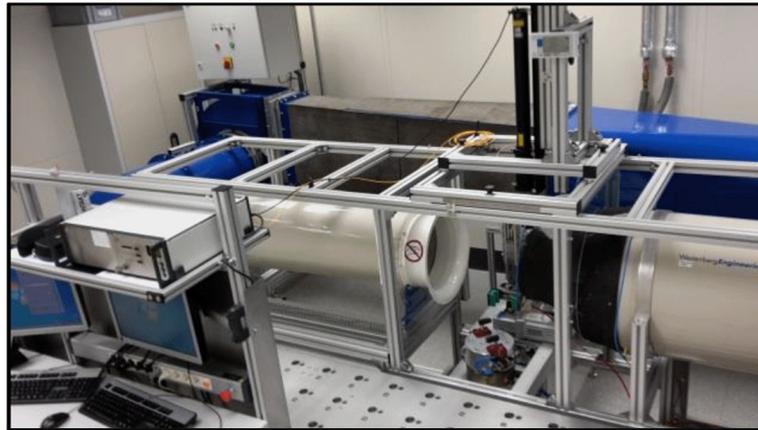


Abbildung A9: Messanordnung des Luft-Windkanals

### A9.2. Kalibrierverfahren

Der Kalibriergegenstand ist entsprechend seiner Anströmrichtung mittig in die Kalibrierposition im Windkanal, im Abstand von 150 mm von der Windkanaldüse auf der Windkanalachse montiert. Die Messposition für das Bezugsnormale zur Bestimmung der Referenzgeschwindigkeit liegt 30 mm von der Windkanaldüse entfernt unter 45° in 90 mm Abstand von der Windkanalachse.

Für die Messdauer je Messung werden mindestens 10 Sekunden gewählt, jede Messung wird 10 Mal wiederholt und aus diesen Messwerten jeweils ein arithmetischer Mittelwert mit zugehöriger Standardabweichung berechnet.



Herausgeber:

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**  
Deutscher Kalibrierdienst  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

[www.dkd.eu](http://www.dkd.eu)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)