

PITOT, DOPPLER UND PRANDTL – WEGBEREITER FÜR HEUTIGE WINDPOTENZIALANALYSEN

PITOT, DOPPLER AND PRANDTL – PIONEERS FOR TODAY'S WINDASSESSMENT

¹⁾**Harald Müller**, ¹⁾**Jessica Kampe**, ²⁾**Dieter Westermann**, ²⁾**Peter Busche**

¹⁾Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig,

²⁾Deutsche WindGuard Wind Tunnel Services GmbH, Oldenburger Straße 65, 26316 Varel,
Tel: 0531-592-1310, Fax: 0531-592-691310, e-mail: harald.mueller@ptb.de

Schlagworte: Prandtl-Rohr, Pitot-Rohr, Laser-Doppler-Anemometrie, Kalibrierung

Key words: Prandtl-Tube, Pitot-Static-Tube, Laser Doppler Velocimety, Calibration

Zusammenfassung

Henri de Pitot und Ludwig Prandtl haben mit ihren Forschungsarbeiten zum Strömungsverhalten von Fluiden wie auch mit der Entwicklung geeigneter Messmittel wie Staurohren (Pitot-Rohr (1732), Prandtl-Rohr) und Windkanälen (Prandtl (1908), Windkanal Göttinger Bauart) grundlegende Voraussetzungen für die Kalibrierung von Anemometern geschaffen. So sind heute alle in der Windenergiebranche zur Anemometerkalibrierung eingesetzten Windkanäle in der Regel Windkanäle Göttinger Bauart mit Prandtl-Rohren (Pitot-Static-Tubes) als Bezugsnormalen. Der Internationale Standard ISO 3966 (2nd edition 2008-07-15) bildet die Grundlage für den Einsatz von Pitot-Static-Tubes als Bezugsnormalen und legt unter anderem die zu verwendenden Geometrien und Kalibrierfaktoren fest. Nach WGFF-Beschluss wie auch nach der IEC 61400-12-1 sind bei der Verwendung von Staurohren als Bezugsnormalen jedoch nur kalibrierte Staurohre einzusetzen. Es wird gezeigt, dass Messungen mit Pitot-Static-Tubes unter Verwendung der in der ISO 3966 vorgegebenen Kalibrierfaktoren bereits innerhalb weniger Promille mit den Messergebnissen der als Transfernormale eingesetzten Laser Doppler Anemometer übereinstimmen.

Einleitung

Im Bereich regenerativer Energien spielen **Windpotenzialanalysen** für die Bilanzierung von Windenergieanlagen eine bedeutende Rolle. Hier sind auf die SI-Einheiten rückgeführte Anemometer zu verwenden, an die zunehmend höhere Anforderungen hinsichtlich ihrer Messunsicherheit gestellt werden. Bisher kommen bei der Kalibrierung von Anemometern mit Messunsicherheiten im Bereich von 1 % in Windkanälen mit Düsenquerschnittsflächen von ca. 1 m² und Geschwindigkeiten von unter 5 m/s bis über 15 m/s in der Regel als **Pitot-Static-Tubes** bezeichnete **Prandtl'sche** Staurohre als Bezugsnormale zum Einsatz.

Die steigende Nachfrage hinsichtlich reduzierter Messunsicherheiten erfordert den Einsatz kalibrierter Laser **Doppler** Anemometer, die mit kleinst möglichen Messunsicherheiten im Bereich von 1 ‰ bis 2 ‰ zum einen die zur Zeit best möglichen Kalibrierungen von Staurohren erlauben und zum andern erstmals die Validierung der auf theoretischen Überlegungen und experimentellen Erfahrungen basierenden Regelungen (ISO 3966) zur Anwendung von Staurohren ermöglichen.

Anemometerkalibrierungen für die Windenergiebranche

Die Kalibrierung der in der Windenergiebranche langjährig bewährten und für rückgeführte Messungen derzeit ausschließlich eingesetzten Schalensternanemometer wird von akkreditierten Kalibrierlaboratorien in Windkanälen vorgenommen, an die hinsichtlich ihrer Messfeldgröße und Strömungsqualität Mindestanforderungen nach der IEC 61400-12-1 Annex F gestellt werden. So müssen die maximal auftretenden Geschwindigkeitsänderungen im Messfeld unter 0,2%, das Blockungsverhältnis unter 0,1 in einem offenen Kanal und die Turbulenzintensität unter 2% liegen. Als Bezugsnormale werden Prandtl-Rohre (Pitot Static Tubes nach der ISO 3966) eingesetzt. Abbildung 1 zeigt einen Blick in die 1 m x 1 m große Windkanalaustrittsdüse des Windkanals „Varel 2“ der Deutschen WindGuard Wind Tunnel Services GmbH mit Sitz in Varel.



Abb. 1: Blick auf die 1 m x 1 m Windkanalaustrittsdüse, im Vordergrund ein zu kalibrierendes Schalensternanemometer in der Prüflingsposition, im Hintergrund an den vier Windkanallecken jeweils ein Prandtl-Rohr und oben die Sensoren eines Ultraschallanemometers

Die als Bezugsnormale eingesetzten Prandtl-Rohre entsprechen der ISO 3966 mit einem Kalibrierfaktor $\alpha = 1,0015$ in der aus der Bernoulli Gleichung folgenden Beziehung zwischen der Geschwindigkeit, dem gemessenen Differenzdruck und der Luftdichte:

$$v = \alpha (1-\varepsilon) \sqrt{2\Delta p/\rho}$$

mit v : Luft-Geschwindigkeit,
 $(1-\varepsilon)$: Kompressibilitäts-Korrekturfaktor für Luft,
 Δp : Differenzdruck am Prandtl-Rohr und
 ρ : lokale Luft-Dichte.

Im Folgenden wird bei den hier betrachteten Strömungsgeschwindigkeiten von unter 40 m/s mit typischen Werten von $\Delta p/p_0 < 10^{-2}$ (p_0 : statischer Druck) für den Korrekturfaktor $(1-\varepsilon)$ in erster Näherung (Fehler $< 2\%$) der Wert 1 angenommen und der Kalibrierfaktor K für ein Prandtl-Rohr bestimmt nach:

$$K = v_{\text{Referenz}} / \sqrt{2\Delta p/\rho} \approx \alpha$$

Prandtl-Rohr-Kalibrierungen im PTB-Windkanal Göttinger Bauart

Die Kalibrierungen im PTB-Windkanal Göttinger Bauart (siehe Abb. 2) erfolgen mit einem auf die SI-Einheiten rückgeführten, d.h. kalibrierten Laser Doppler Anemometer als Bezugsnorm. Mit diesem wird die Strömungsgeschwindigkeit am Referenzort gemessen und daraus die Geschwindigkeit für den Ort des Prüflings, in diesem Fall der Messposition des Prandtl-Rohrs, bestimmt (Abb. 3).

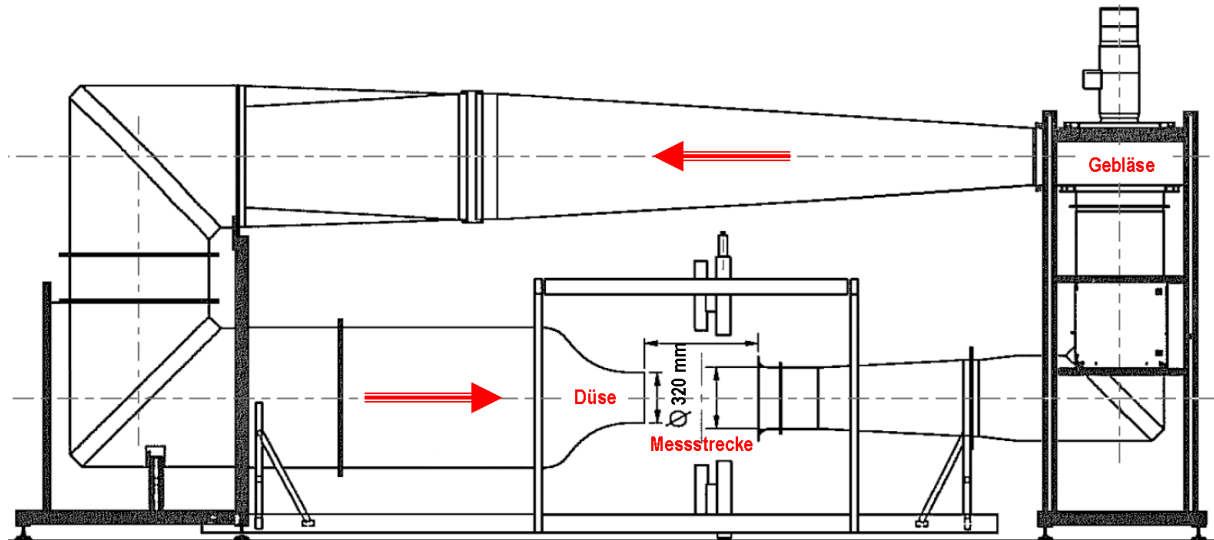


Abb 2: PTB-Windkanal Göttinger Bauart für Geschwindigkeiten im Bereich von ca. 0,5 m/s bis 60 m/s

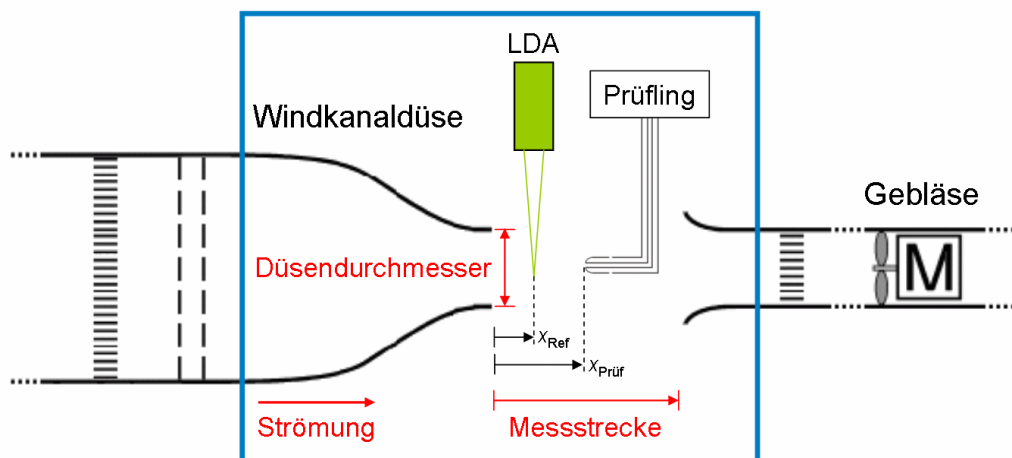


Abb. 3: Kalibrierung im Windkanal durch gleichzeitige Aufnahme von Prüflings- und LDA-Messdaten an der Prüflings- und Referenzposition

Bei der Kalibrierung ist zur Berücksichtigung des örtlichen Abstands zwischen der Prüflingsposition und der durch den Ort des LDA-Messvolumens definierten Referenzposition (siehe hierzu Abb. 3) ein im Allgemeinen von dem gewählten Abstand und der Strömungsgeschwindigkeit abhängiger, windkanalspezifischer Korrekturfaktor zu berücksichtigen. Während dieser Korrekturfaktor bei größeren Windkanälen (Abb. 1) mit ausgedehnten homogenen Messfeldern im Promillebereich liegt, kann er bei Windkanälen mit Messfeldabmessungen im Dezimeterbereich durchaus im Bereich von einem Prozent (siehe Abb. 4) liegen und mit einem Unsicherheitsbeitrag von bis zu 0,3 % ($k=2$) in die Messunsicherheit des Kalibrierergebnisses eingehen.

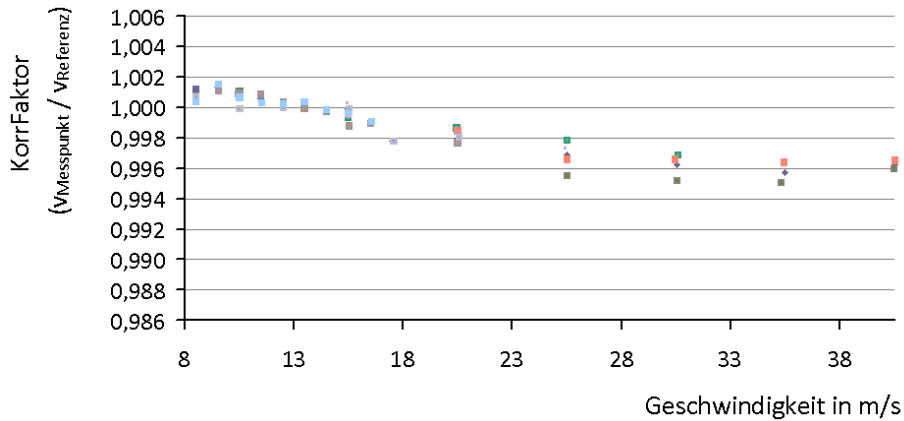


Abb. 4: Beispiel für einen Korrekturfaktorverlauf im Geschwindigkeitsbereich von 10 m/s bis 40 m/s für eine ausgewählte Messgeometrie

Die Abbildung 5 zeigt Ergebnisse von Kalibrierungen unterschiedlicher Prandtl-Rohre, wobei der im Diagramm unter ISO 3966 markierte Bereich den für normgerechte Bauformen angegebenen Kalibrierfaktorwertebereich $\alpha = 1,0015 \pm 0,002$ dargestellt.

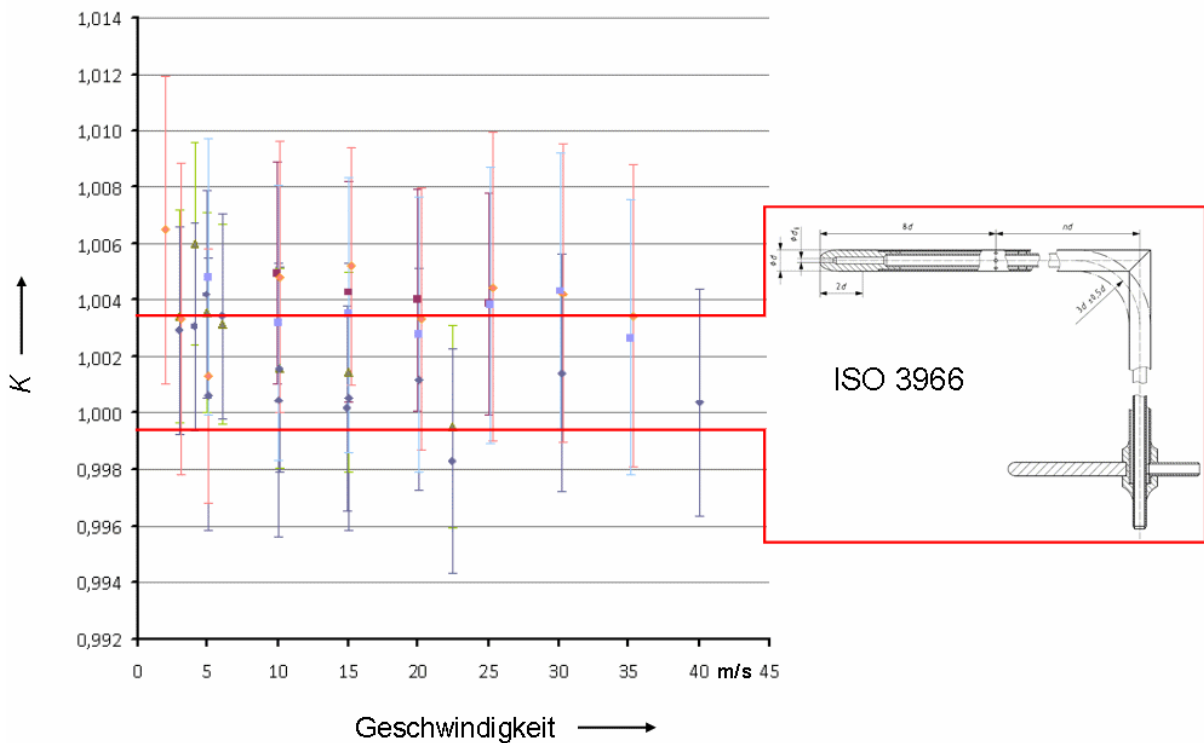


Abb. 5: Gemessene Prandtl-Rohr-Kalibrierfaktoren unterschiedlicher Prandtl-Rohre im Vergleich zu dem in der Norm ISO 3066 angegebenen Kalibrierfaktorwertebereich

Es ist bemerkenswert, dass die in der Norm ausschließlich anhand der Prandtl-Rohr-Geometrie vorgegebenen Kalibrierfaktoren mit den aus rückgeführten LDA-Messungen bestimmten Werten innerhalb der Messunsicherheiten übereinstimmen. Somit konnten die in der Norm angegebenen Kalibrierfaktoren mit Hilfe der Laser Doppler Anemometrie validiert werden.

Laseroptische Rückführung von Prandtl-Rohren als Bezugsnormalen

In verschiedenen Messkampagnen wurden Laser Doppler Anemometer als PTB-Transfernormale im Windkanal der Deutschen WindGuard Wind Tunnel Services GmbH (s. Abb. 1) eingesetzt und Vergleichsmessungen mit den dort entsprechend der IEC 61400-12-1 und der ISO 3966 für die messtechnische Rückführung verwendeten Prandtl-Rohren durchgeführt. Die Abbildung 6 zeigt das Ergebnis von zwei durchgeführten Vergleichsmessungen.

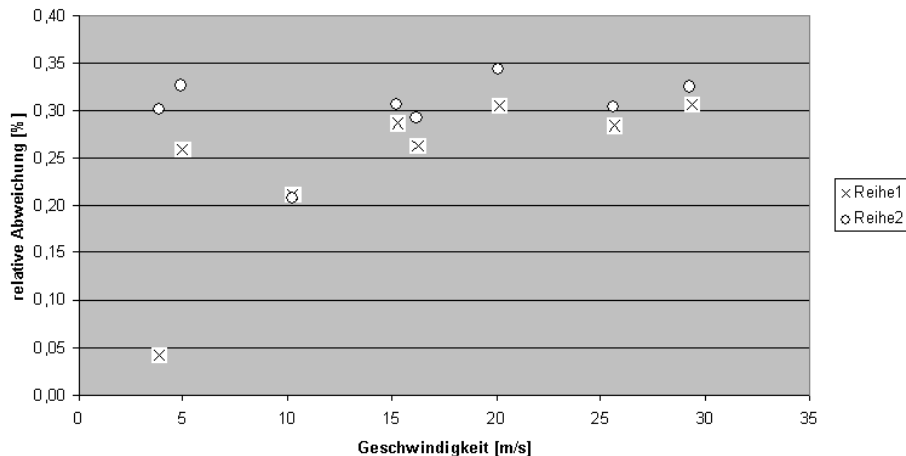


Abb. 6: Relative Abweichungen zwischen gemessenen LDA- und Staurohr- Geschwindigkeitswerten aus zwei unterschiedlichen Messreihen

Die relativen Abweichungen zwischen den mittels Transfer-LDA und Prandtl-Rohren bestimmten Geschwindigkeitswerten lagen in dem hier betrachteten Geschwindigkeitsbereich unter 0,35 %. Bei Geschwindigkeiten von über 5 m/s ist die sehr hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse beider Messreihen mit Abweichungen von zum Teil unter 0,5 ‰ bemerkenswert. Somit lassen sich die traditionsreichen Staurohre nach Prandtl, die im internationalen Sprachgebrauch eher als Pitot-Static-Tubes bezeichnet werden, als äußerst zuverlässige Bezugsnormale in Kalibriereinrichtungen einsetzen.

Resumee

Prandtl-Rohre werden derzeit fast ausschließlich in den akkreditierten Kalibriereinrichtungen der Windenergiebranche als Bezugsnormale für die Kalibrierung von allein in Deutschland weit über 10.000 Anemometern eingesetzt. Vergleichsmessungen mit rückgeführten Laser-Doppler-Anemometern als Transfernormalen haben gezeigt, dass sich mit der von Pitot 1732 erstmals vorgestellten und von Prandtl in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts weiterentwickelten traditionsreichen Staurohr-Technik bei sorgfältiger Handhabung rückführbare Messungen mit Messunsicherheiten im Promillebereich erzielen lassen. Mit zunehmender Verfeinerung der Differenzdruckmessung und den steigenden Anforderungen an präzise Messverfahren und deren Validierung kommt der Laser-Doppler-Anemometrie eine Schlüsselrolle zu. Dies erfordert langfristig auch eine Reduzierung der Messunsicherheit von LDA-Systemen, die derzeit im Bereich von in der Regel größer als 0,12 % anzusetzen ist.

Literatur

INTERNATIONAL STANDARD **IEC 61400-12-1 Wind turbines - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines**, First edition 2005-12,
INTERNATIONAL STANDARD **ISO 3966 Measurement of fluid flow in closed conduits - Velocity area method using Pitot static tubes**, Second edition 2008-07-15