

BEDEUTUNG VON LASER-DOPPLER-ANEMOMETERN FÜR ANEMOMETER-KALIBRIEREINRICHTUNGEN

RELEVANCE OF LASER-DOPPLER-ANEMOMETERS TO ANEMOMETER CALIBRATION LABORATORIES

H. Müller, N. Pape, J. Kampe

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland
Tel: 0531-592-1310, Fax: 0531-592-691310
e-mail: harald.mueller@ptb.de

Laser-Doppler-Anemometer, Anemometerkalibrierung, Vergleichsmessung, Bezugsnormal, Laser Doppler Anemometer, anemometer calibration, intercomparison, reference standard

Zusammenfassung

Anhand aktueller Messergebnisse wird die Bedeutung von Laser-Doppler-Anemometern sowohl für die Nutzung als Bezugsnormal in Kalibriereinrichtungen als auch für den Einsatz als Transfornormal zur Beurteilung der Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen unterschiedlicher Kalibriereinrichtungen vorgestellt.

Mit einem LDA als Transfornormal kann im Falle auftretender Abweichungen bei Anemometerkalibrierungen erstmals zwischen rückführungsbedingten Ursachen (Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit) und rückwirkungsbedingten Einflüssen (anemometer- und kalibriereinrichtungsspezifische Wechselwirkungen) unterschieden werden.

Einleitung

Die Durchführung nationaler und internationaler Vergleichsmessungen spielt eine entscheidende Rolle zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit und gegenseitigen Anerkennung von Kalibrierergebnissen nationaler Metrologieinstitute und akkreditierter Kalibrierlaboratorien. Hierzu werden geeignete Transfornormale von den unterschiedlichen Einrichtungen nach den jeweils dokumentierten Verfahren kalibriert und die Kalibrierergebnisse untereinander verglichen. Dabei sollten auftretende Abweichungen innerhalb der von den Einrichtungen im Rahmen der Rückführung auf die SI-Einheiten dokumentierten Messunsicherheiten liegen, um von einer Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse ausgehen zu können.

Die Durchführung und Auswertung von Vergleichsmessungen ist im Einzelnen durch internationale Leitlinien unter dem BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) geregelt.

Im Bereich der Anemometerkalibrierung sind im letzten Jahrzehnt etliche Vergleichsmessungen durchgeführt worden; alle mehr oder weniger mit dem Ergebnis, dass aufgrund unterschiedlicher Kalibriereinrichtungen, Kalibrierverfahren und Anemometerwechselwirkungen Vergleichbarkeiten im Rahmen der Messunsicherheiten nicht immer gegeben sind.

Ein interessantes Beispiel ist hierfür der internationale Ringvergleich „Key Comparison CC.FF-K3“, der unter der CCM Working Group Flow von den vier nationalen Metrologieinstituten NIST(U.S.A.), VSL (Niederlande), NMIJ/AIST (Japan) und der PTB (Deutschland) unter der Federführung des NMIJ/AIST als Pilot-Laboratorium durchgeführt wurde [1].

Das in die Wertung genommene Ultraschallanemometer (Bild 1) wurde als TransfERNormal von allen Teilnehmern für die beiden Geschwindigkeitswerte 2 m/s und 20 m/s kalibriert.

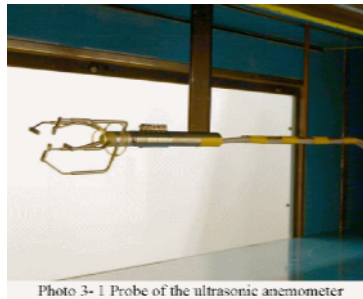


Bild 1: Als TransfERNormal eingesetztes Ultraschallanemometer [1]

Die Ergebnisse der Vergleichsmessung sind in Bild 2 und 3 für beide Geschwindigkeitswerte als Quotient x_i aus der Referenzgeschwindigkeit des Metrologieinstituts i und der mit dem TransfERNormal gemessenen Geschwindigkeit dargestellt. Bild 2 zeigt die Kalibrierergebnisse der Metrologieinstitute mit ihren zugehörigen Messunsicherheiten sowie den nach einem vorgegebenen Auswerteverfahren [2] bestimmten „Key Comparison Reference Value“ einschließlich der resultierenden Messunsicherheit für den Geschwindigkeitswert von 20 m/s.

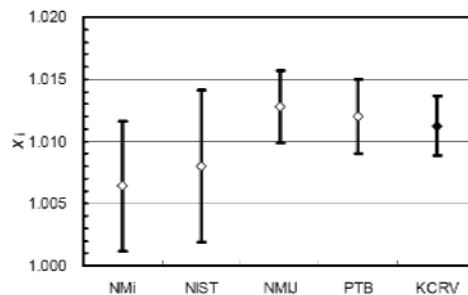


Fig. 5-1 Result of the key comparison (20 m/s)

Bild 2: Key Comparison CC.FF-K3: Ergebnis für 20 m/s [1]

Während die Kalibrierergebnisse für 20 m/s im Rahmen der dokumentierten Messunsicherheiten vergleichbar sind, stellt sich für 2 m/s eine deutlich andere Situation dar (Bild 3).

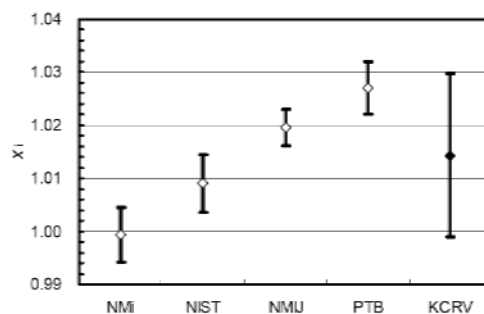


Fig. 6-1 Result of the key comparison at 2 m/s

Bild 3: Key Comparison CC.FF-K3: Ergebnis für 2 m/s [1]

Man erkennt, dass für den Geschwindigkeitswert 2 m/s eine Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse im Rahmen der Messunsicherheiten untereinander nicht mehr gegeben ist und ein gemeinsamer Bezugswert als „Key Comparison Reference Value (KCRV)“ nur dann angegeben werden kann, wenn seine Messunsicherheit hinreichend groß gewählt wird, um alle Ergebnisse einbinden zu können. Dies ist allerdings ein unbefriedigender Zustand, der näherer Klärung hinsichtlich der Ursachen für die unterschiedlichen Messergebnisse bedarf.

Auch die im Rahmen von EURAMET durchgeführten Vergleichsmessungen zeigen, dass für unterschiedliche Anemometertypen in verschiedenen Kalibriereinrichtungen die Vergleichbarkeit der Messergebnisse im Rahmen der Messunsicherheiten nicht immer gegeben ist.

Da die Messunsicherheit eines Kalibrierergebnisses stets sowohl die Messunsicherheit der messtechnischen Rückführung auf die SI-Einheiten als auch das Verhalten des Transfernormals oder Prüflings in der Kalibriereinrichtung beinhaltet, ist eine Beurteilung von Kalibrierergebnissen unterschiedlicher Anemometer in unterschiedlichen Kalibriereinrichtungen mit unterschiedlichen Kalibrierverfahren und Wechselwirkungen im Strömungsfeld um so schwieriger je größer die anzunehmenden Anemometerrückwirkungen sind.

Unter der Annahme einer verlässlichen messtechnischen Rückführung auf die SI-Einheiten sollten daher Vergleichsmessungen mit rückwirkungsarmen Anemometern wie z.B. einem Prandtl-Rohr generell zu besseren Vergleichbarkeiten der Kalibrierergebnisse führen, was die durchgeführten Messungen mit den bisher akkreditierten DKD-Kalibrierlaboratorien belegen (s. Bild 4).

E_n -Werte				PTB - 04.2007	KL3 - 03.2007	KL6 - 06.2007	KL5 - 04.2008	KL1 - 04.2008	KL2 - 06.2008	KL5 - 04.2008	PTB - 04.2009	PTB - 09.2009	KL1 - 09.2009	PTB - 12.2009	KL4 - 12.2009
	k	U	0,995 0,006	1,000 0,008	0,999 0,005	0,996 0,005	0,998 0,008	0,997 0,008	0,998 0,005	0,994 0,005	0,996 0,005	0,996 0,008	0,997 0,005	1,004 0,008	
PTB - 04.2007	0,995	0,006		0,557	0,516	0,146	0,386	0,201	0,376	0,083	0,213	0,181	0,300	0,923	
KL3 - 03.2007	1,000	0,008	0,557		0,158	0,459	0,162	0,320	0,280	0,654	0,434	0,337	0,362	0,295	
KL6 - 06.2007	0,999	0,005	0,516	0,158		0,393	0,030	0,221	0,158	0,655	0,363	0,241	0,265	0,519	
KL5 - 04.2008	0,996	0,005	0,146	0,459	0,393		0,279	0,088	0,242	0,2487	0,060	0,067	0,155	0,834	
KL1 - 04.2008	0,998	0,008	0,386	0,162	0,030	0,279		0,163	0,0934	0,478	0,247	0,180	0,172	0,469	
KL2 - 06.2008	0,997	0,008	0,201	0,320	0,221	0,088	0,163		0,100	0,281	0,046	0,017	0,027	0,632	
KL5 - 04.2008	0,998	0,005	0,376	0,280	0,158	0,242	0,093	0,100		0,505	0,200	0,120	0,101	0,651	
PTB - 04.2009	0,994	0,005	0,083	0,654	0,655	0,249	0,478	0,281	0,505		0,334	0,260	0,430	1,049	
PTB - 09.2009	0,996	0,005	0,213	0,434	0,363	0,060	0,247	0,046	0,200	0,334		0,025	0,104	0,827	
KL1 - 09.2009	0,996	0,008	0,181	0,337	0,241	0,067	0,180	0,017	0,120	0,260	0,025		0,048	0,649	
PTB - 12.2009	0,997	0,005	0,300	0,362	0,265	0,155	0,172	0,027	0,101	0,430	0,104	0,048		0,748	
KL4 - 12.2009	1,004	0,008	0,923	0,295	0,519	0,834	0,469	0,632	0,651	1,049	0,827	0,649	0,748		

Bild 4: Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen verschiedener akkreditierter Kalibrierlaboratorien KL1, ..., KL5 untereinander und mit der PTB nach dem Kriterium $E_n \leq 1$ [3], k : gemessener Kalibrierfaktor des Prandtl-Rohrs, U : erweiterte Messunsicherheit

Diese Ergebnisse legen es nahe, künftig für Vergleichsmessungen rückwirkungsarme oder im Idealfall Laser-Doppler-Anemometer als rückwirkungslose Transfernormale einzusetzen. Generell werden sich minimale Messunsicherheiten für Kalibrierergebnisse erzielen lassen, wenn man LDA-Systeme sowohl als Gebrauchs- bzw. Bezugsnormale für die messtechnische Rückführung als auch als Transfernormale für Vergleichsmessungen zur Validierung der von den Kalibriereinrichtung dokumentierten kleinst möglichen Messunsicherheiten einsetzt.

Aktuelle Ergebnisse internationaler Vergleichsmessungen

Vergleichsmessungen mit einem Laser-Doppler-Anemometer als rückwirkungslosem Transfornormal und einem Ultraschallanemometer mit geringer aber nicht notwendiger Weise vernachlässigbarer Rückwirkung im Strömungsfeld verschiedener Kalibriereinrichtungen verdeutlichen, dass die erzielten Ergebnisse von der Wahl des Transfornormals abhängen.

Bild 5 zeigt die Ergebnisse einer internationalen Vergleichsmessung mit sechs beteiligten Metrologieinstituten bei Verwendung eines rückwirkungsarmen Ultraschallanemometers. Ähnlich zu allen vorangegangenen Vergleichsmessungen sind nicht alle Kalibrierergebnisse im Rahmen der Messunsicherheiten vergleichbar und streuen bei Geschwindigkeiten über 1 m/s zum Teil bis zu 5%.

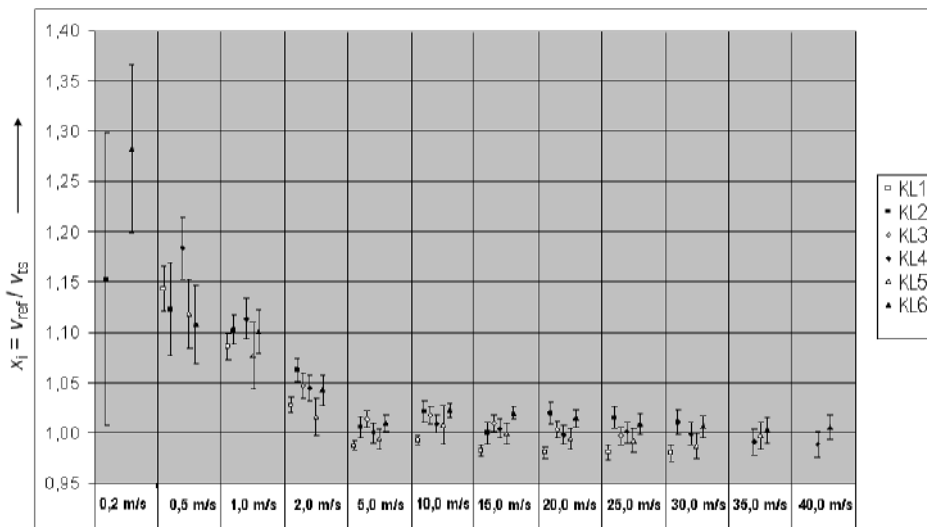


Bild 5: Ergebnis einer Vergleichsmessung mit Ultraschallanemometer (Airflow UA6), 6 Metrologieinstitute (KL1, ..., KL6), Geschwindigkeitsbereich 0,2 m/s bis 40 m/s, v_{ref} Referenzgeschwindigkeit, v_{ts} mit Transfornormal gemessene Geschwindigkeit

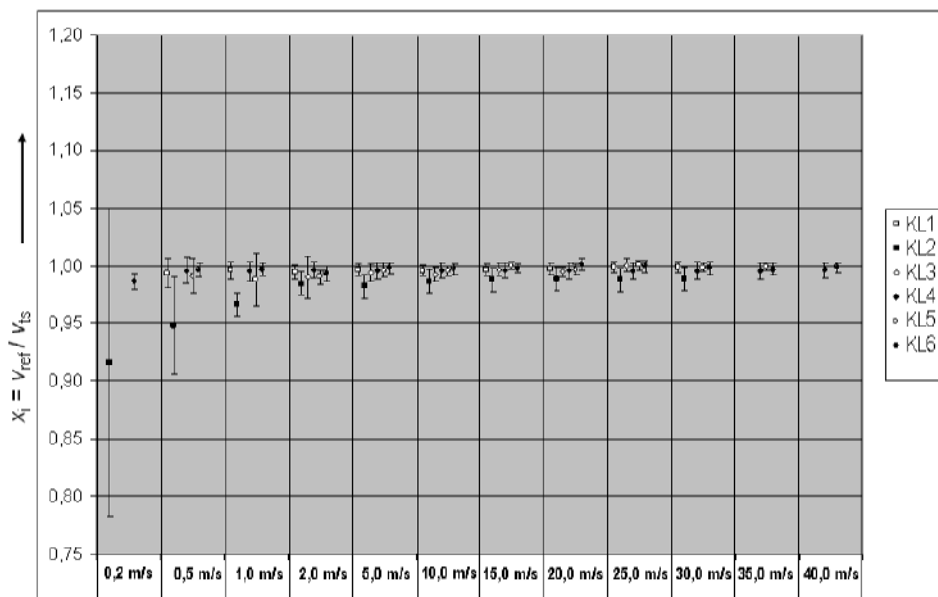


Bild 6: Ergebnis einer Vergleichsmessung mit Laser-Doppler-Anemometer (PTB), 6 Metrologieinstitute (KL1, ..., KL6), Geschwindigkeitsbereich 0,2 m/s bis 40 m/s, v_{ref} Referenzgeschwindigkeit, v_{ts} mit Transfornormal gemessene Geschwindigkeit

Die in Bild 6 dargestellten Ergebnisse der Vergleichsmessungen mit einem LDA als Transfernormal zeigen eine sehr gute Vergleichbarkeit wobei anzumerken ist, dass vier Metrologieinstitute ihre messtechnische Rückführung über LDA-Systeme und lediglich zwei Institute ihre Rückführungen über Volumendurchfluss- (KL2) bzw. Differenzdruckmessungen (KL3) realisiert hatten. Betrachtet man weiterhin nur die Metrologieinstitute mit messtechnischer Rückführung auf LDA-Basis, so erhält man eine Vergleichbarkeit innerhalb weniger Promille.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass aufgrund der berührungslosen und damit rückwirkungsfreien LDA-Vergleichsmessungen gezeigt werden konnte, dass die messtechnischen Rückführungen der einzelnen Metrologieinstitute im Rahmen der Messunsicherheiten generell gegeben ist, so dass Nichtvergleichbarkeiten der Kalibrierergebnisse bisheriger Vergleichsmessungen im Wesentlichen auf unterschiedlichen Anemometerrückwirkungen in den verschiedenen Kalibriereinrichtungen mit unterschiedlichen Kalibrierverfahren beruhen.

Daher sind langfristig einheitliche Richtlinien für die Kalibrierung unterschiedlicher Typen von Anemometern und gegebenenfalls anemometer- und kalibriereinrichtungsspezifische vorzusehen, die sich nur auf der Basis von Laser-Doppler-Anemometermessungen in unterschiedlichen Kalibriereinrichtungen erarbeiten lassen.

Zusammenfassung

Laser-Doppler-Anemometer (LDA) bieten als einzige Anemometer die Möglichkeit Strömungsgeschwindigkeiten rückwirkungsfrei zu messen und die an einem Ort vorliegende Messgröße Geschwindigkeit direkt auf die SI-Einheiten zurückzuführen. Daher spielen kalibrierte LDA-Systeme eine besondere Rolle bei der Beurteilung der Messunsicherheiten von Kalibriereinrichtungen und Kalibrierverfahren sowie der Ergebnisse von Anemometerkalibrierungen.

Literatur

- [1] www.bipm.org/utis/common/pdf/final_reports/.../FF-K3/CCM.FF-K3.pdf
- [2] Cox, M. G., The Evaluation of Key Comparison Data Metrologia, 39, 589 -595, 2002
- [3] Wolfgang Wöger: Remarks on the E_n -Criterion Used in Measurement Comparisons, PTB-Mitteilungen 109 1/99