

Die Bedeutung von Laser-Doppler-Anemometern für Metrologie-Institute

The relevance of Laser-Doppler-Anemometers for Metrology Institutes

Harald Müller, Norbert Pape, Jessica Kampe

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Laser-Doppler-Anemometer, Metrologie-Institute, Kalibriereinrichtungen, Rückführung
Laser-Doppler-Anemometer, Metrology Institutes, calibration facilities, traceability

Zusammenfassung

Im Beitrag werden Beispiele zur besonderen Bedeutung von Laser-Doppler-Anemometern vorgestellt, die verdeutlichen, wie kalibrierte Laser-Doppler-Anemometer in der Metrologie als Bezugsnormale in Kalibriereinrichtungen und als TransfERNormale bei Vergleichsmessungen zur Beurteilung der unterschiedlichen messtechnischen Rückführungen einschließlich der Analyse unterschiedlicher Kalibrierverfahren unverzichtbar geworden sind.

Einleitung

Laser-Doppler-Anemometer (LDA) spielen inzwischen eine Schlüsselrolle für auf die SI-Einheiten rückgeführte Geschwindigkeitsmessungen. Sowohl die nationalen Metrologieinstitute als auch nahezu alle im europäischen Raum akkreditierten Kalibriereinrichtungen setzen Laser-Doppler-Anemometer als Bezugsnormale mit Messunsicherheiten von unter 0,2 % für ihre Kalibrieraufgaben ein.

Diese Entwicklung hat sich auf internationaler Ebene fortgesetzt, zumal die Vorgaben zur Akzeptanz von Primär-Realisierungen für die messtechnische Rückführung auf die SI-Einheiten im Bereich der Strömungsgeschwindigkeit nur wenige Verfahren vorsehen.

So werden nach Beschluss der WGFF (Working Group Fluid Flow) vom Juni 2012 nur drei Verfahren für die Rückführung von Strömungsgeschwindigkeitsmessungen auf die SI-Einheiten akzeptiert:

- Nutzung eines kalibrierten LDA-Systems als Bezugsnormal in einer Strömung (LDA-Kalibrierung mittels rotierender Scheibe als Geschwindigkeitsprimärnormal);
- Nutzung mechanischer Verschiebe- oder Drehvorrichtungen zur Bewegung eines Anemometers durch ein ruhendes Medium (Erzeugung einer definierten Geschwindigkeit mittels Schlitten oder Rotationsarm);
- Nutzung einer Durchflussmeseinrichtung durch Kenntnis des Strömungsprofils über der Austrittsfläche einer Messdüse (Geschwindigkeitsbestimmung aus rückgeführter Volumendurchflussmessung).

Zudem ist die Rückwirkungsfreiheit im Strömungsfeld das entscheidende Alleinstellungsmerkmal der LDA-Systeme unter den Anemometern, insbesondere wenn es um die Beurteilung der Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen und Kalibrierverfahren geht. Daher wird das Laser-Doppler-Anemometer neuerdings auch als TransfERNormal für weltweite über die regionalen Metrologieorganisationen (wie EURAMET in Europa), hinausgehende Ver-

gleichmessungen eingesetzt, um die von den nationalen Metrologieinstituten und Messeinrichtungen proklamierten Messunsicherheiten für Anemometerkalibrierungen zu validieren.

Laser Doppler Anemometer als Bezugsnormale

Ein Blick auf die Messmöglichkeiten europäischer metrologischer Einrichtungen im Bereich der Strömungsgeschwindigkeit macht deutlich, dass die erzielbaren kleinsten Messunsicherheiten für Anemometerkalibrierungen insbesondere vom Verfahren der messtechnischen Rückführung, d.h. von der Art der Bezugsnormale und deren Kalibrierung abhängen.

So werden in vergleichbaren Geschwindigkeitsbereichen beispielweise für Kalibrierungen, die auf einer messtechnischen Rückführung mittels mechanischer Traversiereinrichtungen eines Anemometers beruhen, Unsicherheiten von $> 2\%$ angegeben und für Kalibrierungen, die auf einer messtechnischen Rückführung über den Volumendurchfluss basieren, Unsicherheiten von $> 1\%$. Demgegenüber sind für Anemometerkalibrierungen auf der Basis rückgeführter Laser-Doppler-Anemometer Unsicherheiten von $< 1\%$ möglich, die als CMC- (Calibration and Measurement Capabilities) Angaben für „Fluid Flow – Flow Speed“ in der BIPM-Datenbank der nationalen Metrologieinstitute und Kalibriereinrichtungen mit Werten um $0,5\%$ ($k = 2$) aufgelistet sind.

Demnach werden derzeit die kleinsten Unsicherheiten für Anemometerkalibrierungen bei der Verwendung von Laser-Doppler-Anemometern als Bezugsnormalen erreicht (siehe Abb. 1).

<p>AT (Österreich): Air velocity: 0.3 m/s to 40 m/s Relative expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in %: $(0.4/v_{\text{ref}} + 0.47)$, v_{ref}: gas flow speed in m/s Comparison with Laser Doppler Anemometer Air velocity meter, 0.04 m/s to 2 m/s Relative expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in %: $(0.4/v_{\text{ref}} + 0.47)$, v_{ref}: gas flow speed in m/s Comparison with Laser Doppler Anemometer</p> <p>NL (Niederlande): Air velocity: 0.1 m/s to 1 m/s Relative expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in %: $[(3.2/v) - 2.2]$, v velocity in m/s Wind tunnel/Flow rate Air velocity: 1 m/s to 50 m/s Relative expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in %: 1 Wind tunnel/Flow rate</p> <p>FR (Frankreich): Gas flow speed: 0.15 m/s to 40 m/s Absolute expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in m/s: 0.009 to 0.28 Gas flow speed. Air speed anemometers, 0.05 m/s to 2 m/s Absolute expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in m/s: 0.007 to 0.018 Comparison with Laser Doppler Anemometer</p> <p>IT (Italien): Air speed: 0.10 m/s to 1.1 m/s Relative expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in %: 2 Towing Tank Air speed: 0.25 m/s to 5.0 m/s Relative expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in %: 2 Rotating Arm Air speed: 2.0 m/s to 25 m/s Relative expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in %: 2 Wind Tunnel</p> <p>DE (Deutschland): Gas flow speed: 0.5 m/s to 38 m/s Relative expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in %: 0.25 Comparison with Laser Doppler Anemometer at Deutsche WindGuard Wind Tunnel GmbH Gas flow speed. Air speed anemometers, 0.2 m/s to 40 m/s Absolute expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in m/s: $(0.01 + 0.0045U)$, U speed in m/s Comparison with Laser Doppler Anemometer, Eiffel wind tunnel Gas flow speed. Air speed anemometers, 0.5 m/s to 65 m/s Absolute expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in m/s: $(0.005 + 0.0035U)$, U speed in m/s Comparison with Laser Doppler Anemometer, Göttinger wind tunnel</p>
--

Abb. 1: Anemometerkalibrierung - Messmöglichkeiten einzelner europäischer Metrologieeinrichtungen

In jedem Fall aber müssen die von den einzelnen Metrologieinstituten proklamierten und in der BIPM-Datenbank aufgelisteten CMC-Einträge zu den Kalibrier- und Messmöglichkeiten innerhalb der abgedeckten Strömungsgeschwindigkeitsbereiche und dokumentierten Messunsicherheiten durch Vergleichsmessungen validiert werden.

Insbesondere bei der Validierung kleiner Messunsicherheiten ist zu berücksichtigen, dass der Unsicherheitsbeitrag durch die Rückwirkungen des Transfornormals in der Messeinrichtung die zu validierende Unsicherheit nicht übersteigt und dass eine hinreichende Auflösung und eine angemessene Langzeitstabilität gegeben sind. Die Erfahrungen mit Laser Doppler Anemometern, die als Bezugsnormale in Kalibriereinrichtungen genutzt werden, legen auch ihre Verwendung als Transfornormale für Vergleichsmessungen nahe. Die Abbildung 2 zeigt eine Auswertung zur Langzeitstabilität verschiedener von unterschiedlichen Kalibriereinrichtungen (in Abb. 2: A, ..., I) als Bezugsnormale eingesetzter Laser-Doppler-Anemometer.

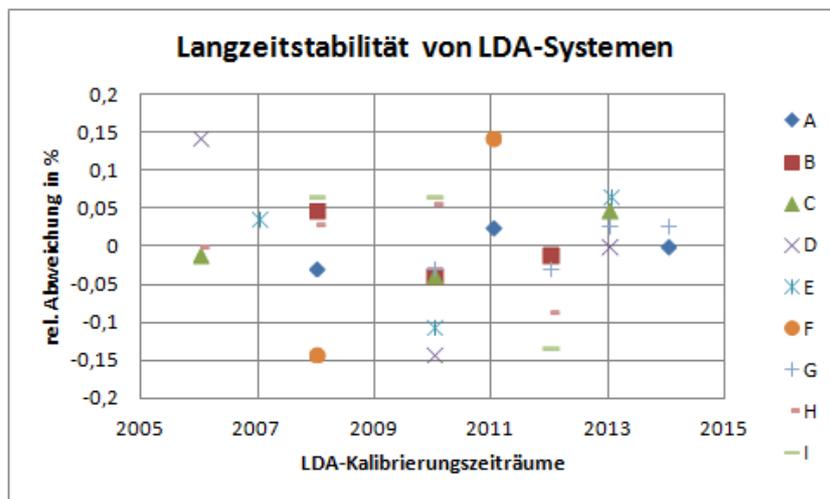


Abb. 2: Stabilität über die Historie einzelner LDA-Systeme unterschiedlicher Einrichtungen

Die relativen Abweichungen der einzelnen Kalibrierungen zum jeweiligen Mittelwert aus allen über Zeiträume von jeweils mehreren Jahren berücksichtigten Rekalibrierungen liegen für alle betrachteten Systeme zum Teil deutlich unter 0,15 % und damit insgesamt unter der für die LDA-Kalibrierungen angegebenen Messunsicherheiten.

Laser Doppler Anemometer als Transfornormale

Am Beispiel der ersten mit einem Laser-Doppler-Anemometer als Transfornormal europaweit durchgeführten Vergleichsmessungen wurde deutlich, dass ein Laser-Doppler-Anemometer als Transfornormal derzeit die einzige Möglichkeit bietet, eine verlässliche Ausgangsbasis zur Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen bei minimalen Messunsicherheiten zu gewährleisten, da die nach dem jeweils dokumentierten Kalibrierverfahren vor Ort durchgeführten LDA-Messungen infolge ihrer Rückwirkungsfreiheit direkte Aussagen zur messtechnischen Rückführung einschließlich der proklamierten Messunsicherheiten beinhalten.

Dies soll im Folgenden am Beispiel ausgewählter Geschwindigkeitsmesswerte der im Rahmen von Vergleichsmessungen bei den einzelnen Teilnehmern nacheinander durchgeführten Messungen mit einem konventionellen Anemometer (Ultraschallanemometer: USA) und einem LDA als Transfornormal verdeutlicht werden. Hierbei wird zur Beurteilung der innerhalb der Messunsicherheiten sicherzustellenden Vergleichbarkeiten das E_n -Kriterium herangezogen.

Hierzu wird zunächst aus den Messergebnissen x_i der n Partner ($i = 1, \dots, n$) der Referenzwert x_{ref} als mit den Messunsicherheiten u_i der Messergebnisse x_i gewichteter Mittelwert bestimmt:

$$x_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_i^2}} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_i^2}} ; \quad U_{ref}(k=2) = 2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_i^2}}}$$

und anschließend der E_n -Wert berechnet nach:

$$E_n(k) = \frac{1}{k} \frac{|x_i - x_{ref}|}{\sqrt{|u_i^2 - u_{ref}^2|}}$$

wobei für Werte von $E_n \leq 1$ das E_n -Kriterium für die Vergleichbarkeit als erfüllt gilt.

Für jeden gewählten Geschwindigkeitswert wurde das Messergebnis x_i des Partners i als Quotient der Referenzgeschwindigkeit zu der mit dem Transfornormal an der Messposition gemessenen Geschwindigkeit dargestellt und jeder Wert als Mittelwert aus zehn gleichzeitig aufgenommenen Messreihen für die Referenz- und die Transfornormal-Geschwindigkeit berechnet.

Aus den europaweit über einen Geschwindigkeitsbereich von 0,5 m/s bis 40 m/s durchgeführten Vergleichsmessungen wurden für die folgende Betrachtung stellvertretend die Messergebnisse für den Geschwindigkeitswert von 2 m/s herausgegriffen, für beide Transfornormale der Referenzwert x_{ref} ($v = 2$ m/s) und die E_n -Werte für die einzelnen Partner bestimmt und in den Abbildungen 3 und 4 zusammengestellt.

	x_i	$u_i(k=1)$	x_{ref}	$u_{ref}(k=1)$	E_n
Partner 1	1,02750	0,00392	1,03773	0,00240	1,65151
Partner 2	1,06267	0,00573	1,03773	0,00240	2,39622
Partner 3	1,04643	0,00627	1,03773	0,00240	0,75068
Partner 4	1,04466	0,00656	1,03773	0,00240	0,56865
Partner 5	1,01592	0,00772	1,03773	0,00240	1,48677
Partner 6	1,04259	0,00677	1,03773	0,00240	0,38386

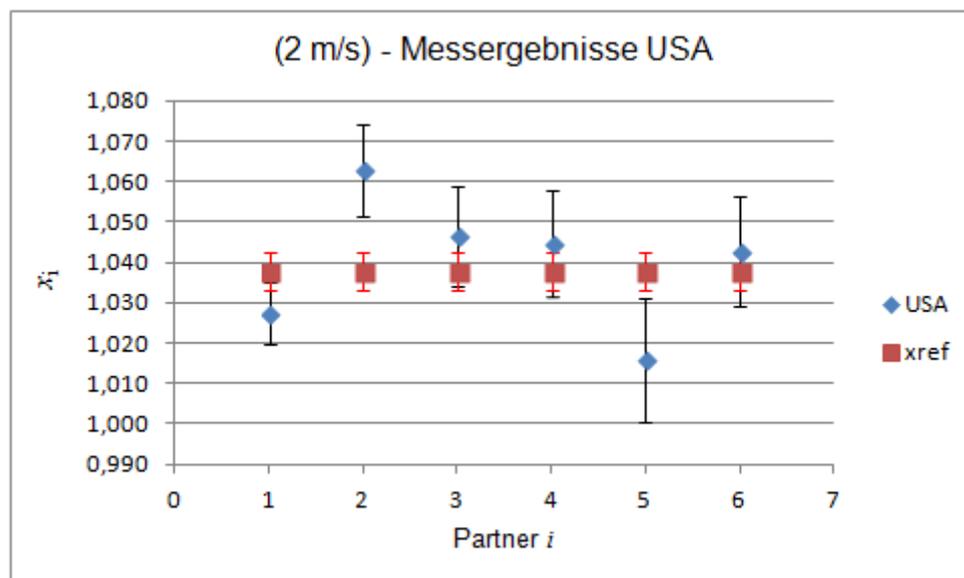


Abb. 3: Ergebnis der Vergleichsmessungen für 2 m/s mit Ultraschallanemometer als Transfornormal

Das in Abb. 3 dargestellte Ergebnis der Vergleichsmessungen mit einem Ultraschallanemometer (USA) als Transfornormal würde nur für die Hälfte der Partner eine Aussage zur Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse auf der Basis des E_n -Kriteriums zulassen. Dies hätte zur Folge, dass Rückführungen und Kalibrierverfahren überprüft und Unsicherheiten gegebenenfalls erhöht werden müssten.

Im Rahmen der Vergleichsmessungen stellt sich für den gleichen Kalibrierablauf mit einem Laser-Doppler-Anemometer als Transfornormal die Situation entsprechend Abb. 4 jedoch anders dar.

	x_i	$u_i(k=1)$	x_{ref}	$u_{ref}(k=1)$	E_n
Partner 1	0,99464	0,00279	0,99306	0,00144	0,33108
Partner 2	0,98481	0,00515	0,99306	0,00144	0,83416
Partner 3	0,99666	0,00585	0,99306	0,00144	0,31773
Partner 4	0,99644	0,00356	0,99306	0,00144	0,52110
Partner 5	0,99009	0,00300	0,99306	0,00144	0,56319
Partner 6	0,99371	0,00321	0,99306	0,00144	0,11432

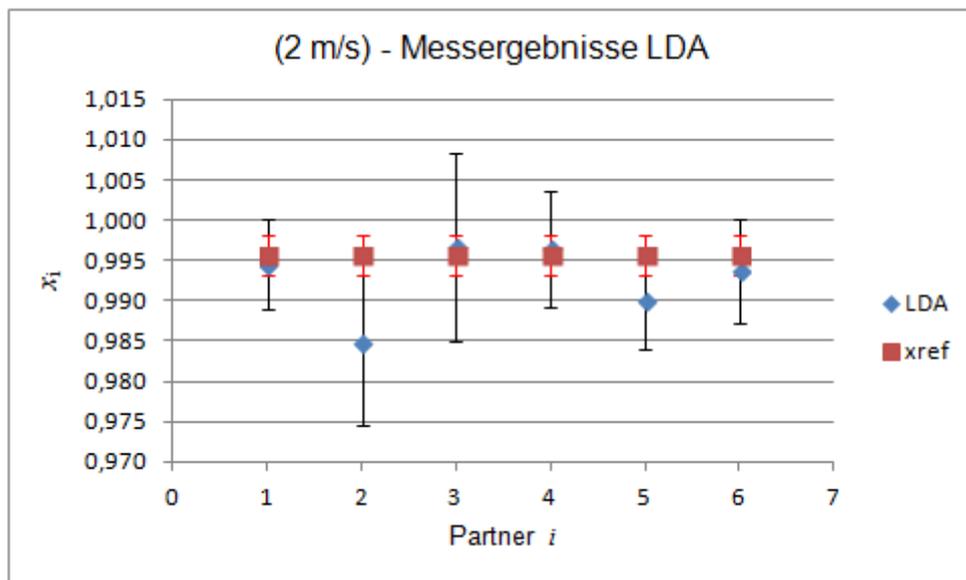


Abb. 4: Ergebnis der Vergleichsmessungen für 2 m/s mit LDA als Transfornormal

Im Fall der Messungen mit einem LDA als Transfornormal ist nun abweichend von der in Abbildung 3 dargestellten Situation eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse aller beteiligten Kalibriereinrichtungen gegeben, so dass die messtechnischen Rückführungen im Rahmen der dokumentierten Messunsicherheiten als validiert angesehen werden können.

Die Diskrepanz zwischen den in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellten Ergebnissen bestätigt die bisherigen Erfahrungen aus vergangenen Vergleichsmessungen, dass aufgrund der unterschiedlichen Anemometerrückwirkungen in den unterschiedlichen Kalibriereinrichtungen für die Validierung kleinster Messunsicherheiten im Rahmen von Vergleichsmessungen möglichst rückwirkungsarme Anemometer oder sofern möglich rückwirkungsfreie LDA-Systeme als Transfornormale eingesetzt werden sollten.

Aus diesem Grund wurde für den derzeit laufenden „Key Comparison“ für „Air Speed“ (weltweit angelegter Ringvergleich) neben einem bauartgleichen Ultraschallanemometer aus der letzten internationalen Vergleichsmessung erstmals auch ein kommerzielles Laser-Doppler-Anemometer als „best available meter“ als zweites Transfornormal eingesetzt.

Laser Doppler Anemometer als Instrument zur internen Qualitätssicherung

Die in den Metrologieeinrichtungen eingesetzten Kalibrierverfahren beruhen auf der messtechnischen Rückführung der Messgröße am Ort des Prüflings. Für Anemometerkalibrierungen in einem Windkanal gehen je nach Art der Rückführung unterschiedliche windkanalspezifische Korrektur- und/oder Kalibrierfaktoren mit ihren Messunsicherheiten in das Kalibrierergebnis ein. Zur Überprüfung der im Rahmen eines Kalibrierverfahrens realisierten messtechnischen Rückführung bietet ein kalibriertes Laser-Doppler-Anemometer als rückwirkungsfreies Messmittel optimale Voraussetzungen. Hier liefert der Quotient aus der in der Kalibriereinrichtung eingestellten Referenzgeschwindigkeit und der mit einem kalibrierten LDA an der Prüflingsposition gemessenen Strömungsgeschwindigkeit einen schnellen Überblick. Im Idealfall sollte der Quotient innerhalb der Messunsicherheiten um den Wert 1 liegen.

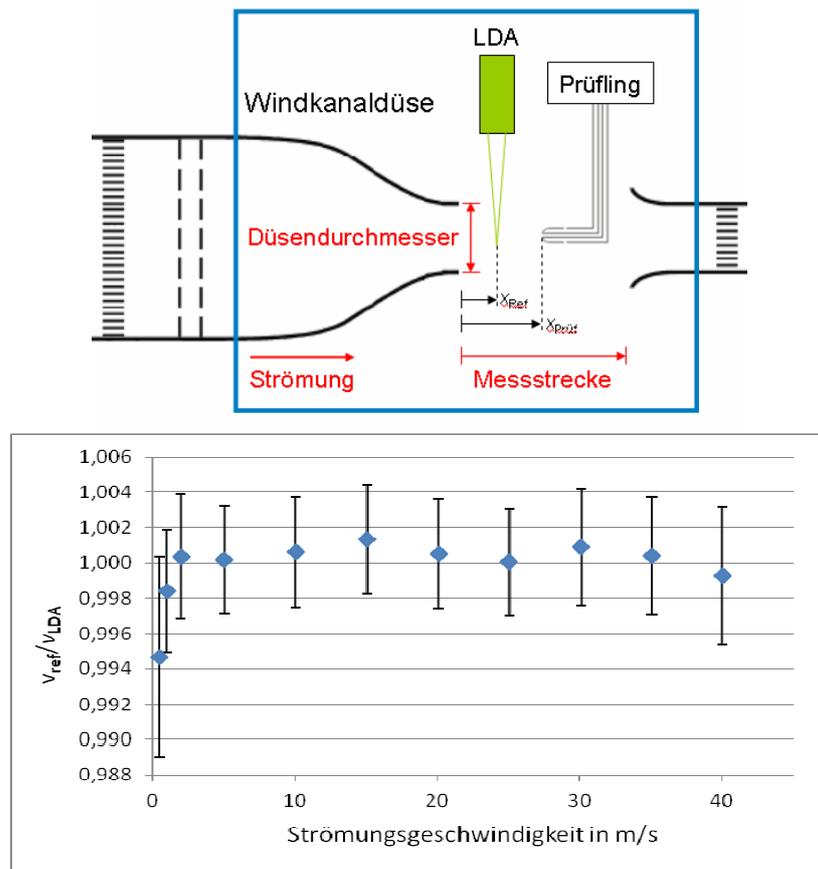


Abb. 5: Überprüfung der messtechnischen Rückführung mit einem LDA als Prüfling

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis einer Messung im Göttinger Windkanal der PTB, bei der die aus den Bezugsnormal-LDA-Messungen am Referenzort x_{Ref} unter Berücksichtigung des Abstands von Referenz- und Prüflingsposition für die Prüflingsposition $x_{Prüf}$ bestimmten Referenzgeschwindigkeitswerte v_{ref} mit den Geschwindigkeitsmesswerten v_{LDA} eines zweiten kalibrierten LDA-Systems an der Prüflingsposition verglichen wurden. Für den vorliegenden Fall, dass die Quotienten v_{ref}/v_{LDA} innerhalb der Messunsicherheiten bei Werten um 1 liegen, kann das Ergebnis zur Validierung des Kalibrierverfahrens einschließlich der Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der lokalen Differenz zwischen Referenz- und Prüflingsposition im betrachteten Geschwindigkeitsbereich von 0,5 m/s bis 40 m/s herangezogen und turnusmäßige Wiederholungen als qualitätssichernde Maßnahmen in Kalibriereinrichtungen genutzt werden.

Zusammenfassung

Kalibrierte Laser-Doppler-Anemometer haben sich durch ihre Langzeitstabilität und ihre Messgenauigkeit als Bezugsnormale in den meisten Metrologieinstituten etabliert und besitzen vor allem durch ihre Rückwirkungsfreiheit eine Sonderstellung hinsichtlich der Validierung von Kalibrierverfahren und der Beurteilung messtechnischer Rückführungen einzelner Kalibriereinrichtungen.

Hervorzuheben ist der derzeitige Einsatz eines kommerziellen Laser-Doppler-Anemometers als TransfERNormal in einer internationalen Vergleichsmessung (CCM.FF.K3 Air Speed) bei der erstmals aufgrund der Rückwirkungsfreiheit des TransfERNormals in den einzelnen Einrichtungen ein unmittelbarer Vergleich der messtechnischen Rückführungen mit geringster Messunsicherheit möglich wird.

Literatur

Müller, H., 2013: "LDA-based intercomparison of anemometers", Metrologia, 2013, 50, Techn. Suppl., 07005 EUROMET.M.FF-S5 Final Report, 2012, 25 pages

http://www.bipm.org/en/committees/cc/ccm/tor_wgff.html

http://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list.asp?Sservice=M/FF.9.7