

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



Vergleichsbericht Ringvergleich DKD-V 11-4 Strömungsgeschwindigkeit im Bereich von 1 m/s bis 35 m/s mittels Flügelrad-Anemometer

Ausgabe 03/2025

<https://doi.org/10.7795/550.20250312>



| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 2/40 |

Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen seit der Gründung 1977 zusammengeschlossen. Am 3. 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-Technischen Bundesanstalt (PTB)

DKD-Geschäftsstelle

Bundesallee 100 38116 Braunschweig

Postfach 33 45 38023 Braunschweig

Telefon Sekretariat: 0531 5 92-80 21

Internet: <https://www.ptb.de/cms/metrologische-dienstleistungen/dkd.html>

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 3/40 |

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Vergleichsbericht DKD-V 11-4: Nationaler Ringvergleich Strömungsgeschwindigkeit im Bereich von 1 bis 35 m/s mittels Flügelrad-Anemometer, Ausgabe 03/2025, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20250312

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 nur nicht-kommerziell verbreitet werden darf. Eine Nutzung der Inhalte für die kommerzielle Verwendung in Kalibrierlaboratrien ist ausdrücklich erlaubt.



Autoren:

Jessica Kampe, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig
Dr.-Ing. Julia Hornig, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig
Dr. Arne Taube, Höntzsch GmbH & Co. KG, Waiblingen

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

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 4/40 |

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.

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.

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 5/40 |

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| Abkürzungen | 6 |
| Begriffe nach DIN ISO 13528:2020-09..... | 6 |
| 1. Ziel des Ringvergleichs..... | 7 |
| 2. Allgemeine Informationen über den Ringvergleich..... | 7 |
| 3. TransfERNormal..... | 7 |
| 4. Teilnehmer und Zeitplan..... | 9 |
| 5. Stabilität des TransfERNormals | 10 |
| 6. Messergebnisse der Kalibrierlaboratorien..... | 12 |
| 7. Angewendetes Auswerteverfahren | 14 |
| 7.1. Bestimmung der Ringvergleichsreferenzwerte..... | 14 |
| 7.2. Kompatibilität der Messergebnisse | 14 |
| 7.3. Scheitern der Kompatibilitätsprüfung..... | 15 |
| 7.4. Leistungsbewertung der Teilnehmer..... | 15 |
| 8. Auswertung der Teilnehmerergebnisse | 16 |
| 8.1. Vorgehensweise | 16 |
| 8.2. Auswertung der Messergebnisse | 16 |
| 9. Bewertung des Ringvergleichs | 18 |
| 10. Weiterführende Analyse..... | 18 |
| 10.1. Vorangegangene Messreihe in den Jahren 2018/19 | 19 |
| 10.2. Untersuchungen zur Eintauchtiefe des Flügelradanemometers..... | 19 |
| 10.3. Ergänzende Betrachtung zur Messunsicherheit..... | 19 |
| 11. Ausblick auf zukünftige Ringvergleichsmessungen..... | 21 |
| Referenzen..... | 22 |
| Anhang A – Ergebnisse der Kompatibilitätsprüfung..... | 23 |
| Anhang B – Darstellung der Messwerte zur Eintauchtiefen-Untersuchung..... | 24 |
| Anhang C – Prüfstände und Kalibrierverfahren der einzelnen Teilnehmer..... | 27 |

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 6/40 |

Abkürzungen

| | |
|-------|---|
| BMC | Best Measurement Capability |
| CMC | Calibration and Measurement Capability, vormalis auch BMC genannt |
| DAkkS | Deutsche Akkreditierungsstelle |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DKD | Deutscher Kalibrierdienst |
| E_n | standardisierte Leistungskenngröße |
| KBS | Konformitätsbewertungsstelle (Kalibrierstelle, Kalibrierlaboratorium) |
| MU | Messunsicherheit |
| MW | Mittelwert (arithmetisches Mittel) |
| PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt |
| Stabw | Standardabweichung |

Begriffe nach DIN ISO 13528:2020-09

Ringversuch/Ringvergleich

Organisation, Durchführung und Bewertung von Messungen an denselben (oder ähnlichen) Gegenständen durch zwei oder mehr Laboratorien entsprechend vorherbestimmter Bedingungen

Eignungsprüfung

Bewertung der Leistung eines Teilnehmers durch Ringversuche (Ringvergleiche) nach zuvor aufgestellten Kriterien

zugewiesener Wert

Wert, der dem Prüfgegenstand für die Eignungsprüfung zugewiesen wurde (Referenzwert)

Messabweichung

Messwert minus eines Referenzwerts

Konsenswert

Wert, der aus einer Sammlung von Ergebnissen in einem Ringversuch (Ringvergleich) abgeleitet wurde

Ausreißer

Wert unter einer Serie von Werten, der mit den anderen Werten dieser Serie nicht verträglich ist

Teilnehmer

Laboratorium, Organisation oder Einzelperson, welche(s) die Prüfgegenstände erhält und Ergebnisse für die Bewertung durch den Anbieter/Organisator der Eignungsprüfung abliefern

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 7/40 |

1. Ziel des Ringvergleichs

Der in diesem Bericht zusammengefasste Ringvergleich soll der Überprüfung der Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse der teilnehmenden Kalibrierlaboratorien im Sinne von Punkt 7.7.2 der DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [1] als Eignungsprüfung dienen. Er wurde von Januar bis November 2020 durchgeführt.

Für die Leistungsbeurteilung der Teilnehmer wurde, wie bei Kalibrierungen üblich, die standardisierte Leistungskenngröße E_n verwendet. Grundlage dieses Bewertungsansatzes ist der Vergleich der Differenz des Ergebnisses des Teilnehmers mit einem zugewiesenen Referenzwert. Dabei wird sowohl die angegebene Unsicherheit des Teilnehmers als auch die Unsicherheit des zugewiesenen Werts berücksichtigt [2].

Im Rahmen der Analyse und Diskussion der Messergebnisse sind alle Teilnehmer dazu aufgerufen, über ihre Erfahrungen im Umgang mit dem Anemometer zu berichten. Die gesammelten Erkenntnisse und daraus ggf. resultierende Schlussfolgerungen können von allen Teilnehmern zur Kompetenzerweiterung und der effektiven Verbesserung der Qualität der Kalibrierergebnisse verwendet werden. Zu einem späteren Zeitpunkt sollen diese Erkenntnisse in eine Richtlinie zur Vereinheitlichung der Kalibrierverfahren einfließen.

2. Allgemeine Informationen über den Ringvergleich

Auf der Sitzung des DKD-Fachausschusses *Strömungsmessgrößen* im Oktober 2019 wurde beschlossen, einen weiteren Ringvergleich für die Messgröße „Strömungsgeschwindigkeit“ durchzuführen. Die Organisation erfolgte durch Herrn Dr. Taube (Höntzsch GmbH & Co. KG). Der geplante Ringvergleich orientierte sich an einer vorangegangenen Messreihe unter den Teilnehmern (s. Abschnitt 0), bei der dasselbe TransfERNormal verwendet wurde.

Jedes teilnehmende Labor war aufgerufen, die bereitgestellten Sensoren entsprechend seiner Akkreditierung (Bereich und Verfahren) zu kalibrieren und im Anschluss die ausgestellten Kalibrierscheine der Arbeitsgruppe 1.41 „Strömungsmessgrößen“ der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt für die Auswertung zur Verfügung zu stellen.

Bei der 15. Fachausschusssitzung „Strömungsmessgrößen“ am 24.09.2020 wurden den Teilnehmern erste Ergebnisse anonymisiert vorgestellt. Jedem teilnehmenden Labor wurde im Anschluss daran Daten zur Verfügung gestellt, um ihre eingereichten Ergebnisse auf Plausibilität zu überprüfen und ggf. Korrekturen einreichen zu können. Am 26.11.2020 erfolgte dann die Präsentation der Ergebnisse mit namentlicher Zuordnung. Alle teilnehmenden Labore waren in einem Online-Meeting zusammengeschaltet und gaben hierfür ihre Zustimmung.

3. TransfERNormal

Für die Kalibrierungen wurde ein Flügelradanemometer (Typ: TS26/16GE-mn40A/125/p0/ZG1; SN: mn40 13106 125 °C) mit einem Geschwindigkeitsbereich von 0,4 m/s, ..., 40 m/s als TransfERNormal verwendet. Bei dem verwendeten Flügelradanemometer (s. Abbildung 1) handelt es sich um einen von der Firma Höntzsch GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellten Strömungssensor mit Richtungsanzeiger, der zusammen mit dem mitgelieferten Handgerät (Typ: flowtherm NT, SN: NT 1317) betrieben werden sollte. Eine Dämpfung der Anzeige von 5 s wurde im Handgerät voreingestellt. Für die Verwendung des Sensors in Windkanälen mit großen Durchmessern stand zudem eine Verlängerungsstange aus Edelstahl zur Verfügung.

Nach der vorangegangenen Messreihe (2018/19) fand beim Hersteller eine Wartung des Gerätes statt. In diesem Zusammenhang wurde der Flügel der Sonde erneuert.

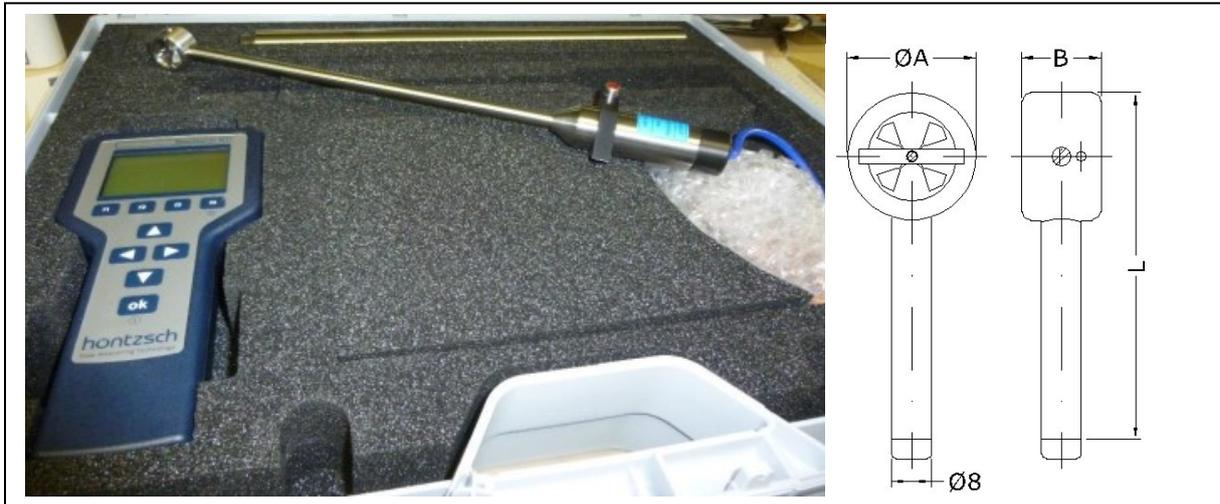


Abbildung 1: Flügelradanemometer mit Handgerät, Sensorkopf-Durchmesser ($\varnothing A = 26 \text{ mm}$), Sensorkopf-Länge ($B = 26 \text{ mm}$) und Sensorlänge (gesamt) $L = 350 \text{ mm}$, Schaftdurchmesser 8/25 mm mit Gewinde zum Anschrauben von Verlängerungsstangen $\varnothing 25 \text{ mm}$

Die Referenzmessungen zur Überwachung der Stabilität des Sensors wurden bei der Firma Höntzsch GmbH & Co. KG durchgeführt. Als Kalibrierpunkte wurden folgende Geschwindigkeiten festgelegt:

| | | | | | | |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 1 m/s | 2 m/s | 5 m/s | 10 m/s | 20 m/s | 30 m/s | 35 m/s |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|

Die Strömungsgeschwindigkeiten sollten für die einzelnen Kalibrierpunkte so eingestellt werden, dass die Ist-Werte des Prüflings möglichst mit den vorgesehenen Geschwindigkeiten übereinstimmen. (Einstellgröße war damit immer der Ist-Wert des Sensors.)

Als Kalibrierergebnis bzw. als zu bestimmte Messgröße x_i sollte jeweils die Abweichung Δv zwischen der angezeigten Geschwindigkeit des Sensors ($v_{\text{Prüfling}}$) und der Referenzgeschwindigkeit (v_{Referenz}) des teilnehmenden Labors entsprechend Formel (1) bestimmt werden. Die Gesamtmessunsicherheit für die Kalibrierung ergab sich aus den vom jeweiligen Teilnehmer eingereichten Kalibrierschein.

$$x_i = \Delta v = v_{\text{Prüfling}} - v_{\text{Referenz}} \quad (1)$$

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 9/40 |

4. Teilnehmer und Zeitplan

Als Teilnehmer des Ringvergleichs ursprünglich eingeplant waren alle zu Beginn des Vergleichs für die Messgröße „Strömungsgeschwindigkeit von Gasen“ DAkkS-akkreditierten Konformitätsbewertungsstellen (KBS) sowie das designierte Institut BEV/E+E aus Österreich. Die folgende Tabelle 1 listet alle Labore auf, die an diesem Ringvergleich teilgenommen haben, und gibt einen Überblick über den zeitlichen Ablauf des Vergleichs.

Tabelle 1: Teilnehmer und Kalibrierzeiträume des Ringvergleichs DKD-V 11-4

| Ansprechpartner | Labor | Adresse | Datum |
|--|--|---|---------------------------------------|
| Arne Taube arne.taube@hoentzsch.com | Höntzsch GmbH & Co. KG | Gottlieb-Daimler-Str. 37 71334 Waiblingen | 30.01.-08.02.2020 Pilotlabor |
| Richard Seidl Richard.Seidl@dwd.de | Deutscher Wetterdienst (Süd) | Referat TI35C3 August-Schmauss-Str. 1 85764 Oberschleißheim | 19.02.-28.02.2020 |
| Martin Förderer MFoerderer@testotis.de | Testo Industrial Services GmbH | Gewerbestraße 3 79199 Kirchzarten | 29.02.-09.03.2020 |
| Rainer Mock rainer.mock@airflow.de | Airflow Lufttechnik GmbH | Kleine Heeg 21 53359 Rheinbach | 10.03.-19.03.2020 |
| Klaus Hölper hoelper@westenberg-engineering.de | Westenberg Engineering | Vitalisstr. 100 50827 Köln | 20.03.-29.03.2020 |
| Dietmar Pachinger dietmar.pachinger@epluse.at | E+E Elektronik Ges.m.b.H. | Langwiesen 7 4209 Engerwitzdorf Österreich | 30.03.-08.04.2020 |
| Lothar Blaschke lothar.blaschke@otthydromet.com | G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH | Gutenbergstr. 20 70736 Fellbach | 09.04.-18.04.2020 |
| Arne Taube arne.taube@hoentzsch.com | Höntzsch GmbH & Co. KG | Gottlieb-Daimler-Str. 37 71334 Waiblingen | 19.04.-28.04.2020 Zwischenprüfung |
| Rudolf Waldera waldera@ahlborn.de | Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH | Eichenfeldstr.1 83607 Holzkirchen | 07.05.-13.05.2020 |
| Holger Dörschel Holger.Doerschel@dwd.de | Deutscher Wetterdienst (Nord) | Referat TI33C3 Frahmredder 95 22393 Hamburg | 24.05.-02.06.2020 |
| Dietmar Wüstenberg dw@ammonit-windtunnel.com | Ammonit Wind Tunnel GmbH | Reuterstraße 13 18211 Bargeshagen | 03.06.-12.06.2020 |
| Catharina Herold C.Herold@windguard.de | Deutsche WindGuard GmbH | Oldenburger Straße 65 26316 Varel | 23.06.-02.07.2020 |
| Arne Taube arne.taube@hoentzsch.com | Höntzsch GmbH & Co. KG | Gottlieb-Daimler-Str. 37 71334 Waiblingen | 06.08.-09.09.2020 Abschlussmessung |

5. Stabilität des Transfernormals

Zur Überprüfung der Stabilität des Transfernormals wurde das Flügelradanemometer vom Pilotlabor (Firma Höntzsch GmbH & Co. KG) insgesamt dreimal (zu Beginn, etwa nach der Hälfte und am Ende des Ringvergleichs) kalibriert. Tabelle 2 fasst die hierbei ermittelten Messergebnisse zusammen. Abbildung 2 stellt die Messergebnisse der drei Wiederholungsmessungen grafisch dar.

Weitere Unsicherheitsbeiträge wie z. B. ein möglicher Blockage-Effekt oder die Auflösung des jeweiligen Handgerätes werden hier nicht weiter betrachtet. Die Berücksichtigung dieser Beiträge obliegt den Laboren, die die entsprechenden Beiträge in ihre für die Kalibrierung angegebenen Messunsicherheiten einbeziehen.

Tabelle 2: Zusammenfassung der drei Wiederholungsmessungen zur Überprüfung der Stabilität des Flügelradanemometers während des Ringvergleichs

| Nennwert | Vorabmessung (31.01.2020) | | Zwischenmessung (30.04.2020) | | Abschlussmessung (09.09.2020) | |
|----------|------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Δv in m/s | $U(\Delta v)$ in m/s | Δv in m/s | $U(\Delta v)$ in m/s | Δv in m/s | $U(\Delta v)$ in m/s |
| 1,0 m/s | 0,08 | 0,013 | 0,10 | 0,013 | 0,09 | 0,013 |
| 2,0 m/s | 0,17 | 0,013 | 0,17 | 0,013 | 0,19 | 0,013 |
| 5,0 m/s | 0,17 | 0,025 | 0,17 | 0,025 | 0,16 | 0,025 |
| 10,0 m/s | -0,08 | 0,051 | -0,07 | 0,051 | -0,07 | 0,051 |
| 20,0 m/s | -0,13 | 0,102 | -0,11 | 0,102 | -0,09 | 0,101 |
| 30,0 m/s | -0,04 | 0,151 | 0,04 | 0,151 | 0,03 | 0,151 |
| 35,0 m/s | -0,05 | 0,175 | 0,08 | 0,177 | 0,03 | 0,176 |

Die in der vorstehenden Tabelle 2 aufgeführten Werte zeigen, dass über den gesamten Zeitraum des Ringvergleichs keine wesentliche Veränderung im Messverhalten des Flügelradanemometers festgestellt werden kann. Aus den aufgetretenen Abweichungen der drei Wiederholungsmessungen ergeben sich die Messunsicherheitsbeiträge des Typs B für die Stabilität des Sensors während der Dauer des Ringvergleichs (s. Tabelle 3 – Stabilität Sensor).

Der Hersteller gibt für das Flügelrad im Datenblatt eine Reproduzierbarkeit der Messwerte von $\pm (0,05 \% \text{ v. M.} + 0,02 \text{ m/s})$ an [3]. Für einige Geschwindigkeiten ergeben sich daraus größere Messunsicherheitsbeiträge als aus den oben beschriebenen Messungen zur Stabilität des Sensors (vgl. Tabelle 3 – Reproduzierbarkeit).

Für die Auswertung soll im Folgenden der jeweils größere Betrag (resultierend aus Stabilität oder Reproduzierbarkeit) in der Messunsicherheit des Sensors berücksichtigt werden. Die Berechnung der Messunsicherheiten Typ B erfolgt nach EA-4/02 M: 2022 [4] Kap. 3.3.

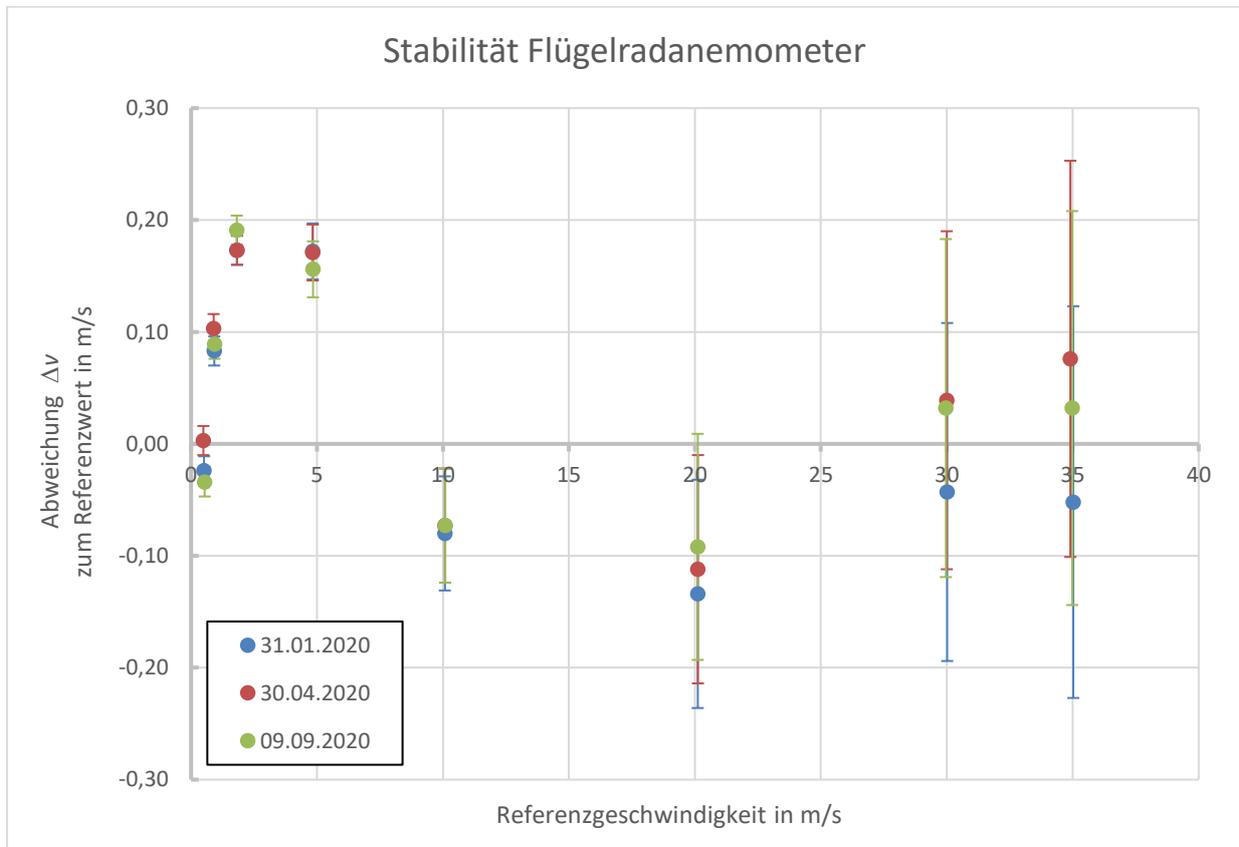


Abbildung 2: Grafische Darstellung der Wiederholungsmessungen

Tabelle 3: Übersicht der resultierenden Standardmessunsicherheitsbeiträge aufgrund der Stabilität des Sensors und der Reproduzierbarkeit lt. Datenblatt für das TransfERNormal (blau hinterlegt ist der jeweils größere Betrag dieser beiden, welcher für die weiteren Berechnungen verwendet wird); Berechnung der resultierenden Messunsicherheiten Typ B nach EA-4/02 M: 2022 [4] Kap. 3.3.

| Nennwert | Stabilität Sensor | | Reproduzierbarkeit | |
|----------|-----------------------------|---------|--------------------|---------|
| | Betrag $\Delta_{\max-\min}$ | res. MU | Betrag | res. MU |
| in m/s | in m/s | in m/s | in m/s | in m/s |
| 1,0 | 0,020 | 0,012 | 0,021 | 0,012 |
| 2,0 | 0,018 | 0,010 | 0,021 | 0,012 |
| 5,0 | 0,016 | 0,009 | 0,023 | 0,013 |
| 10,0 | 0,007 | 0,004 | 0,025 | 0,014 |
| 20,0 | 0,042 | 0,024 | 0,030 | 0,017 |
| 30,0 | 0,082 | 0,047 | 0,035 | 0,020 |
| 35,0 | 0,128 | 0,074 | 0,038 | 0,022 |

Die sich aus Tabelle 3 ergebenden Messunsicherheitsbeiträge (Typ B) werden dem Flügelradanemometer entsprechend beigeordnet und bei der folgenden Auswertung in Abschnitt 8.2 mit den von den einzelnen Laboren für den jeweiligen Messpunkt angegebenen Messunsicherheiten quadratisch addiert.

6. Messergebnisse der Kalibrierlaboratorien

Dieser Abschnitt fasst die Ergebnisse der Kalibrierlaboratorien zusammen. Die hier dargestellten Messergebnisse x_i wurden aus den übermittelten Kalibrierscheinen entnommen. Die Anzahl der angegebenen Nachkommastellen wurden in der Regel ebenfalls direkt aus den Kalibrierscheinen übernommen. In den Fällen, in denen die Differenz zwischen Referenz und Sensorwert nicht explizit genannt wird, orientiert sich die Anzahl der hier dargestellten Nachkommastellen an der für den Messwert des Sensors angegebenen.

Eine Bewertung der Ergebnisse wird in diesem Abschnitt nicht vorgenommen. Sie erfolgt erst in Abschnitt 9, auf Basis des in Abschnitt 7 beschriebenen Auswerteverfahrens und der in Abschnitt 8 durchgeführten Auswertung.

Die folgende Tabelle 4 fasst die Kalibrierergebnisse des Flügelradanemometers in Abhängigkeit des jeweiligen Teilnehmers (Lab 01-11) zusammen. Die sich anschließende Tabelle 5 weist die diesen Ergebnissen zugeordneten erweiterten Gesamtmessunsicherheiten (Erweiterungsfaktor $k = 2$) aus. Abbildung 3, die diesen Abschnitt abschließt, fasst die relativen Abweichungen von Prüflings- zu Referenzwert für die jeweiligen Geschwindigkeitswerte der Teilnehmer noch einmal grafisch zusammen.

Tabelle 4: Kalibrierergebnisse x_i des Flügelradanemometers (Abweichung zwischen Referenz und Sensor als Absolutwert) laut Kalibrierschein des jeweiligen Teilnehmers

| v_{nenn} | 1 m/s | 2 m/s | 5 m/s | 10 m/s | 20 m/s | 30 m/s | 35 m/s |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | x_i |
| | in m/s |
| Lab 01 | 0,089 | 0,191 | 0,156 | -0,073 | -0,092 | 0,032 | 0,032 |
| Lab 02 | 0,06 | 0,19 | 0,16 | -0,06 | -0,01 | 0,14 | 0,18 |
| Lab 03 | 0,12 | 0,19 | 0,14 | -0,14 | -0,16 | -0,01 | 0,06 |
| Lab 04 | 0,084 | 0,175 | 0,150 | -0,004 | 0,132 | 0,410 | --- |
| Lab 05 | 0,112 | 0,205 | 0,180 | 0,045 | 0,084 | 0,262 | 0,298 |
| Lab 06 | 0,114 | 0,205 | 0,203 | 0,092 | 0,097 | 0,306 | 0,382 |
| Lab 07 | 0,10 | 0,18 | 0,14 | -0,06 | -0,14 | -0,07 | -0,07 |
| Lab 08 | 0,10 | 0,19 | 0,17 | -0,08 | -0,13 | -0,02 | 0,06 |
| Lab 09 | 0,09 | 0,16 | 0,09 | -0,17 | -0,19 | -0,06 | -0,07 |
| Lab 10 | --- | --- | 0,11 | -0,10 | --- | --- | --- |
| Lab 11 | 0,055 | 0,216 | 0,134 | -0,085 | -0,02 | 0,232 | 0,334 |

Tabelle 5: Erweiterte Gesamtmessunsicherheiten $U(x_i)$ für das Flügelradanemometer laut Kalibrierschein des jeweiligen Teilnehmers

| v_{nenn} | 1 m/s | 2 m/s | 5 m/s | 10 m/s | 20 m/s | 30 m/s | 35 m/s |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | $U(x_i)$ |
| | in m/s |
| Lab 01 | 0,013 | 0,013 | 0,025 | 0,051 | 0,101 | 0,151 | 0,176 |
| Lab 02 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,12 | 0,24 | 0,36 | 0,42 |
| Lab 03 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,18 |
| Lab 04 | 0,022 | 0,026 | 0,045 | 0,083 | 0,162 | 0,241 | --- |
| Lab 05 | 0,012 | 0,013 | 0,025 | 0,051 | 0,100 | 0,149 | 0,174 |
| Lab 06 | 0,010 | 0,014 | 0,028 | 0,052 | 0,101 | 0,150 | 0,174 |
| Lab 07 | 0,03 | 0,03 | 0,06 | 0,10 | 0,16 | 0,25 | 0,31 |
| Lab 08 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,22 |
| Lab 09 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,12 | 0,24 | 0,36 | 0,42 |
| Lab 10 | --- | --- | 0,10 | 0,10 | --- | --- | --- |
| Lab 11 | 0,062 | 0,063 | 0,044 | 0,045 | 0,065 | 0,085 | 0,098 |

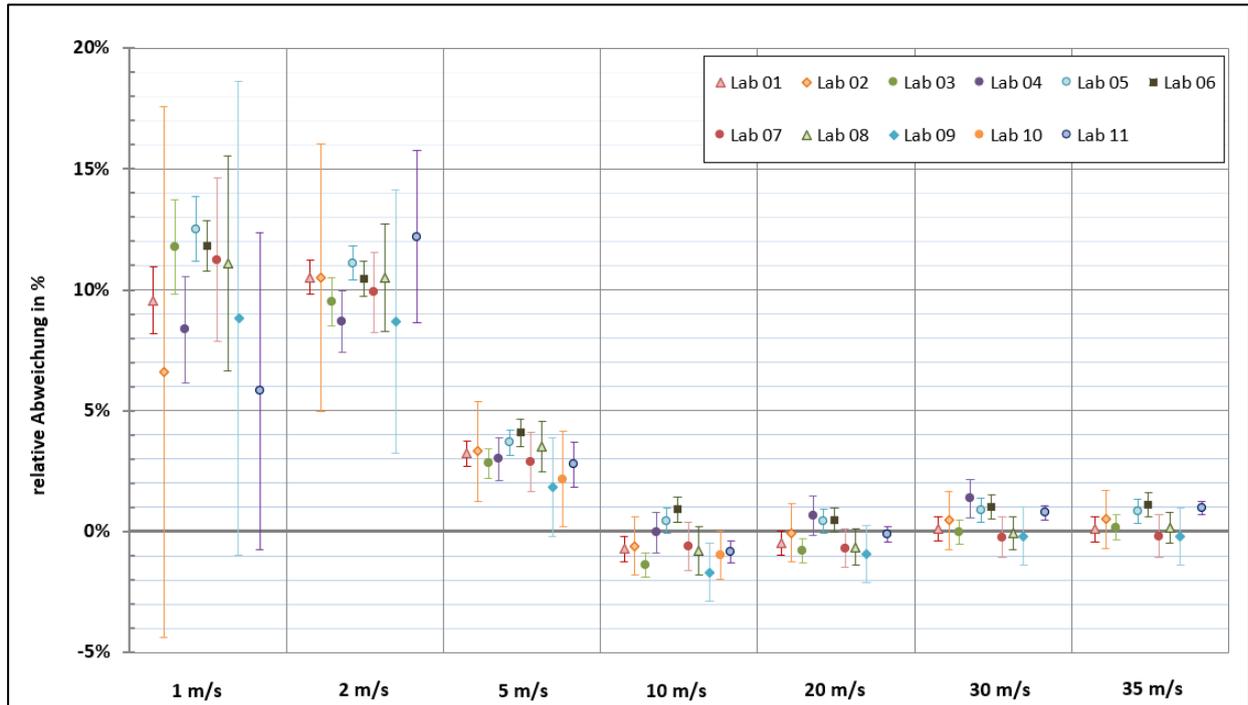


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Kalibrierergebnisse des Flügelradanemometers; dargestellt sind die relativen Abweichungen von Prüflings- zu Referenzwert und die zugehörigen Messunsicherheiten für die jeweiligen Geschwindigkeitswerte der einzelnen Teilnehmer, wie im Kalibrierschein angegeben

| | | | |
|---|--|--|------------------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | | DKD-V 11-4 |
| | | | Version: 03/2025 |
| | | | Revision: 0 |
| | | | Seite: 14/40 |

7. Angewandetes Auswerteverfahren

7.1. Bestimmung der Ringvergleichsreferenzwerte

Die jeweiligen Ringvergleichsreferenzwerte y_{RV} werden für jeden Geschwindigkeitswert einzeln bestimmt. Die Berechnung der Referenzwerte erfolgt nach der Methode A von Cox [5].

Hiernach ergeben sich die Referenzwerte y_{RV} als gewichtete Mittelwerte nach folgender Formel:

$$y_{RV} = \frac{x_1/u^2(x_1) + x_2/u^2(x_2) + \dots + x_n/u^2(x_n)}{1/u^2(x_1) + 1/u^2(x_2) + \dots + 1/u^2(x_n)} \quad (2)$$

mit n Anzahl der Teilnehmer
 x_1, x_2, \dots, x_n Messergebnisse der Kalibrierlaboratorien 1, 2, ... n
 $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_n)$ Standardmessunsicherheiten der Laboratorien 1, 2, ... n .

Die zugehörigen Standardmessunsicherheiten der Referenzwerte $u(y_{RV})$ sind gegeben durch:

$$\frac{1}{u^2(y_{RV})} = \frac{1}{u^2(x_1)} + \frac{1}{u^2(x_2)} + \dots + \frac{1}{u^2(x_n)} \quad (3)$$

Die erweiterte Messunsicherheit des Referenzwertes $U(y_{RV})$ ergibt sich aus der Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$. Der Wert der Messgröße liegt somit entsprechend [4] mit einer ungefähren Wahrscheinlichkeit von 95 % im ermittelten Wertebereich und ergibt sich wie folgt:

$$U(y_{RV}) = 2u(y_{RV}) \quad (4)$$

7.2. Kompatibilität der Messergebnisse

Mit Hilfe des im Folgenden beschriebenen Verfahrens soll sichergestellt werden, dass aus den eingereichten Messergebnissen ein gültiger Referenzwert bestimmt werden kann, oder ob die Ergebnisse der Teilnehmer zu weit voneinander abweichen, um einen eindeutigen Referenzwert zu bestimmen.

Zur Überprüfung der Kompatibilität der Messergebnisse wird für jeden Geschwindigkeitswert ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt, indem zunächst die Prüfgröße X_{obs} berechnet wird:

$$X_{obs}^2 = \frac{(x_1 - y_{RV})^2}{u^2(x_1)} + \frac{(x_2 - y_{RV})^2}{u^2(x_2)} + \dots + \frac{(x_n - y_{RV})^2}{u^2(x_n)} \quad (5)$$

Für die Kompatibilitätsprüfung muss die Anzahl der Freiheitsgrade ν bestimmt werden, welche sich aus der Anzahl n der Teilnehmer, die die entsprechende Geschwindigkeit gemessen haben, ergibt:

$$\nu = n - 1 \quad (6)$$

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 15/40 |

Der Chi-Quadrat-Test gilt als **nicht bestanden**, falls¹:

$$Pr \{ \chi^2(v) > \chi_{obs}^2 \} < 0,05 \quad (7)$$

Ist die Kompatibilität gegeben, der Test also bestanden, so kann der Wert y_{RV} als Ringvergleichsreferenzwert und $U(y_{RV})$ als erweiterte Unsicherheit des Ringvergleichsreferenzwerts verwendet werden.

7.3. Scheitern der Kompatibilitätsprüfung

Wenn die Kompatibilität nach Abschnitt 7.2 nicht gegeben ist, der Test also scheitert, müssen weitere Maßnahmen ergriffen werden, um einen gültigen Referenzwert zu ermitteln. Hierzu werden iterativ Messwerte der Teilnehmer aus der Auswertung herausgenommen. Dabei sind jene Teilnehmer zu wählen, welche den höchsten Anteil daran haben, dass die Kompatibilitätsprüfung nicht bestanden wird [6]. Aus den verbleibenden Messwerten wird dann nach o. g. Verfahren der neue Referenzwert gebildet. Grundsätzlich gilt: Je kleiner das Ergebnis des Chi-Quadrat-Tests, desto größer die Übereinstimmung.

Das Ziel hierbei ist es, eine Gruppe aus möglichst vielen Teilnehmern zu bilden, die die größtmögliche Übereinstimmung miteinander ergeben [6]². Je weniger Teilnehmerdaten dabei ausgeklammert werden müssen, umso besser.

7.4. Leistungsbewertung der Teilnehmer

Bei Vergleichen von Kalibrierungen ist es üblich, zur Leistungsbewertung der einzelnen Teilnehmer den E_n -Wert zu bestimmen [2]. Dieser E_n -Wert berechnet sich wie folgt³:

$$E_n = \frac{x_i - y_{RV}}{\sqrt{U^2(x_i) - U^2(y_{RV})}} \quad (8)$$

Entsprechend DIN EN ISO/IEC 17043:2010-05 [7] sind Werte $|E_n| \leq 1$ als „zufriedenstellende“ Leistung zu betrachten. $|E_n| > 1$ hingegen bedeutet im Umkehrschluss eine „nicht zufriedenstellende“ Leistung und sollte vom betreffenden Teilnehmer als Hinweis genutzt werden, die Ursachen hierfür zu ermitteln.

¹ Pr bedeutet in diesem Fall: „Probability of“; In der Auswertung wurde hierfür die Excel-Funktion „CHIU.INV.RE(0,05;v)“ benutzt.

$\chi^2(v)$ stellt hierbei die kritische Schranke abhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade/Anzahl der Teilnehmer dar, bei der das festgelegte Signifikanzniveau (hier $\alpha = 0,05$) nicht überschritten wird. Entsprechende Tabellen sind in der Literatur unter dem Stichwort „Chi-Quadrat-Vergleichstabelle“ zu finden.

² LCS – Largest consistent subset; In seltenen Fällen – wenn der Chi-Quadrat-Test über mehrere Runden durchgeführt wird und mehrere Teilnehmer aus der Rechnung herausgenommen werden müssen – kann dies dazu führen, dass nicht unbedingt die Ergebnisse, welche in der jeweiligen Runde den größten Anteil beim Chi-Quadrat-Test liefern, gestrichen werden, sondern jene, welche das Ausscheiden von möglichst wenigen Teilnehmern bewirken.

³ Formel (8) berücksichtigt die Korrelation der Messwerte, aus denen der Referenzwert gebildet wird. Für Messwerte, die aufgrund eines nicht bestandenen Chi-Quadrat-Tests ausgeklammert werden – die also nicht zur Referenzwertermittlung beitragen – wird die Formel entsprechend Cox [5] angepasst verwendet.

8. Auswertung der Teilnehmerergebnisse

8.1. Vorgehensweise

In einem ersten Schritt wurden entsprechend Abschnitt 7.1 die Referenzwerte jeder Geschwindigkeit und deren erweiterte Messunsicherheit bestimmt. Den Teilnehmern wurde daraufhin vier Wochen Zeit gegeben, um ihre Ergebnisse zu überprüfen und mit den ermittelten Referenzwerten zu vergleichen. In einigen Fällen wurden daraufhin Korrekturen durchgeführt oder Ergebnisse zurückgezogen, damit diese nicht in die Leistungsbewertung einfließen. Die aktualisierten Messergebnisse aus dem Oktober 2020 bilden die Basis der folgenden Auswertung (die Tabelle zur Kompatibilitätsprüfung befindet sich in Anhang A – Ergebnisse der Kompatibilitätsprüfung).

8.2. Auswertung der Messergebnisse

Für die Geschwindigkeiten 1,0 m/s, 2,0 m/s, 5,0 m/s und 35,0 m/s wurde die Kompatibilitätsprüfung nach Abschnitt 7.2 bestanden. Für die übrigen Geschwindigkeiten musste das Verfahren nach Abschnitt 7.3 durchgeführt werden, um einen gültigen Referenzwert zu erhalten. Für das Flügelradanemometer ergeben sich die Referenzwerte daher entsprechend der folgenden Tabelle 6.

Tabelle 6: Resultierende Ringvergleichs-Referenzwerte y_{RV} für das Flügelradanemometer einschließlich erweiterter Messunsicherheiten $U(y_{RV})$

| | v_{Nenn} | | | | | | |
|--------------------|-------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 m/s | 2 m/s | 5 m/s | 10 m/s | 20 m/s | 30 m/s | 35 m/s |
| y_{RV} in m/s | 0,102 | 0,192 | 0,159 | -0,090 | -0,070 | 0,110 | 0,187 |
| $U(y_{RV})$ in m/s | 0,011 | 0,012 | 0,015 | 0,026 | 0,047 | 0,070 | 0,084 |

Mit den vorstehenden Werten für den Referenzwert und dessen jeweiliger erweiterter Messunsicherheit wurden im Anschluss nach Formel (8) die E_n -Werte als Kennzahl für die Übereinstimmung zwischen Referenzwert und Messergebnis des Teilnehmers berechnet. Die folgende Tabelle 7 gibt eine Übersicht dieser so ermittelten Werte und die aufgetretenen Nicht-Vergleichbarkeiten, wenn $|E_n| > 1$.

Tabelle 7: Übersicht der E_n -Werte für das Flügelradanemometer – Berechnung aus den Messergebnissen der Teilnehmer und dem für die jeweiligen Geschwindigkeitswerte bestimmten Ringvergleichs-Referenzwert; in Rot dargestellt sind die Werte mit $|E_n| > 1$ (nicht zufriedenstellend/vergleichbar)

| v_{nenn} | 1 m/s | 2 m/s | 5 m/s | 10 m/s | 20 m/s | 30 m/s | 35 m/s |
|-------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | E_n | E_n | E_n | E_n | E_n | E_n | E_n |
| Lab 01 | 0,486 | 0,260 | 0,367 | 0,139 | 0,160 | 0,474 | 0,726 |
| Lab 02 | 0,410 | 0,024 | 0,009 | 0,252 | 0,248 | 0,083 | 0,015 |
| Lab 03 | 0,626 | 0,085 | 0,518 | 0,962 | 0,897 | 0,734 | 0,583 |
| Lab 04 | 0,592 | 0,521 | 0,182 | 1,030 | 1,240 | 1,120 | --- |
| Lab 05 | 0,420 | 0,503 | 0,639 | 2,112 | 1,273 | 0,938 | 0,526 |
| Lab 06 | 0,523 | 0,493 | 1,252 | 2,809 | 1,371 | 1,029 | 0,922 |
| Lab 07 | 0,052 | 0,339 | 0,299 | 0,302 | 0,439 | 0,697 | 0,771 |
| Lab 08 | 0,043 | 0,055 | 0,202 | 0,104 | 0,402 | 0,618 | 0,504 |
| Lab 09 | 0,117 | 0,318 | 0,675 | 0,659 | 0,501 | 0,464 | 0,587 |
| Lab 10 | --- | --- | 0,480 | 0,095 | --- | --- | --- |
| Lab 11 | 0,717 | 0,354 | 0,513 | 0,117 | 0,748 | 1,148 | 0,946 |

In der grafischen Darstellung der Auswertung in Abbildung 4 sind die Abweichungen der einzelnen Messwerte vom Referenzwert dargestellt. Der Referenzwert ist dabei mit der x-Achse identisch und hat den Wert „0“. Die erweiterten Messunsicherheiten, die den Messwerten in der Darstellung beigeordnet sind, enthalten jeweils sowohl die erweiterte Messunsicherheit des Messergebnisses als auch die des zugehörigen Referenzwertes. Der Vorteil dieser Darstellung liegt darin, dass sofort ersichtlich ist, ob ein Messergebnis mit dem Referenzwert vergleichbar ist: Schneidet der Unsicherheitsbalken die x-Achse bzw. den Referenzwert, ist der Messwert mit dem Referenzwert vergleichbar. Dies entspricht einem Wert $|E_n| \leq 1$ [8].

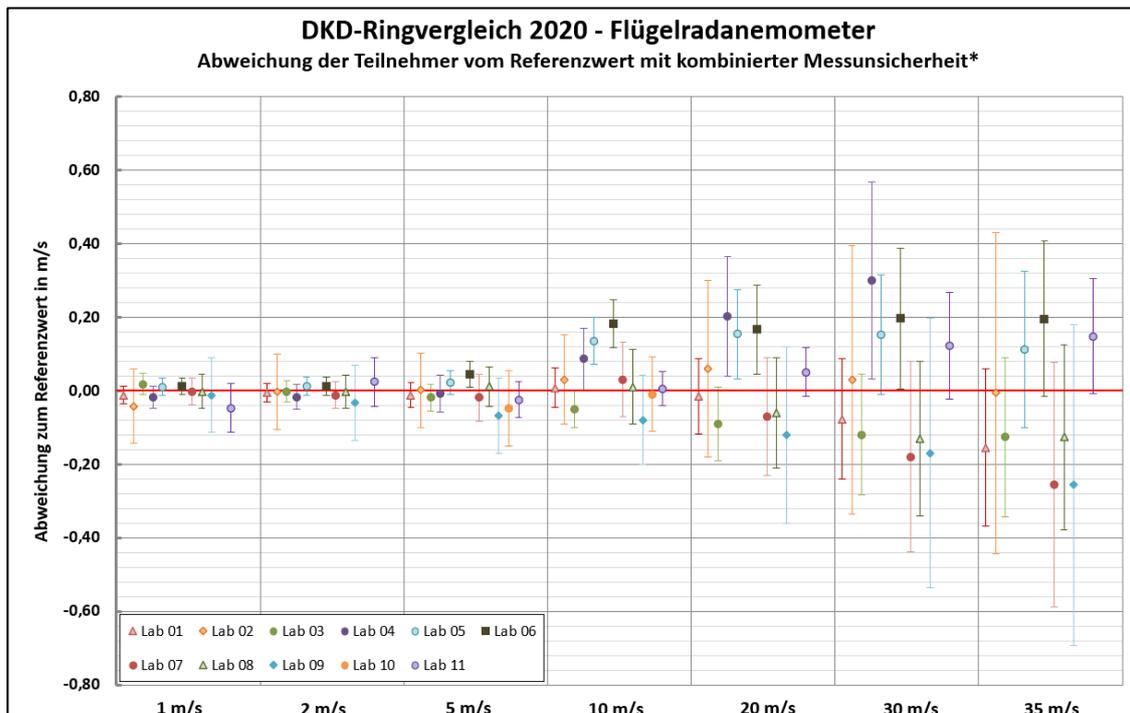


Abbildung 4: Grafische Darstellung der Abweichungen der einzelnen Messwerte vom Referenzwert (hier per Definition = 0)

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 18/40 |

9. Bewertung des Ringvergleichs

Der hier zugrunde liegende Ringvergleich wurde von den Mitgliedern des DKD-Fachausschusses *Strömungsmessgrößen* für die Messgröße Strömungsgeschwindigkeit in der oben beschriebenen Weise durchgeführt. Als Transfernormal wurde das in Abschnitt 3 charakterisierte Flügelradanemometer genutzt.

Als Gesamtergebnis ergibt sich im unteren Geschwindigkeitsbereich (1 m/s, ..., 5 m/s) für alle Teilnehmer eine gute Übereinstimmung. Im Geschwindigkeitsbereich von 10 m/s, ..., 35 m/s ist eine zunehmende Streuung der Messwerte zu erkennen, was sich in der Vergleichbarkeit der Teilnehmer untereinander sowie in den E_n -Werten niederschlägt. Auffällig ist, dass sich zu steigenden Geschwindigkeiten hin zwei „Äste“ mit Gruppen von Messergebnissen ausbilden – einer, der zunehmend in Richtung negativer Abweichungen tendiert, und einer, der im Bereich positiver Abweichungen liegt.

Von 71 Messwerten führten 65 zu konsistenten Datensätzen und flossen in die Berechnung der Referenzwerte ein. Dies entspricht einer Quote von 91,5 %. Für 10 Messergebnisse konnte $|E_n| < 1$ nicht erfüllt werden (vgl. Tabelle 7), d. h. die Leistung des jeweiligen Labors ist als „nicht zufriedenstellend“ zu bewerten (vgl. Abschnitt 7.4). Dies entspricht 14,1 % aller Messwerte und liegt damit deutlich zu hoch. Aufgrund der statistischen Verteilung im Zusammenhang mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ liegt der Erwartungswert bei lediglich 5 %⁴ [5].

10. Weiterführende Analyse

Bereits 2018/19 hatte nahezu derselbe Teilnehmerkreis an Kalibrierlaboratorien den Ringvergleich DKD-V 11-2 [9] durchgeführt, bei dem ein Staurohr als Transfernormal genutzt wurde. Bei diesem Vergleich zeigte sich insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung aller durchgeführten Messungen. Da Staurohre im Allgemeinen nur geringe Rückwirkungen auf die verschiedenen Windkanalmesseinrichtungen haben, war dieses Ergebnis erwartbar. Bei zum damaligen Zeitpunkt parallel durchgeführten Messungen mit dem in diesem Ringvergleich genutzten Flügelradanemometer waren die Abweichungen zwischen den Laboratorien jedoch um einiges größer (s. Abschnitt 10.1). Dies bestätigte die allgemeine Vermutung, dass die Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen stark vom Kalibriergegenstand und dessen strömungsmechanischen Besonderheiten abhängig ist, die individuell für jede Windkanalmesseinrichtung berücksichtigt werden müssen.

Um Flügelradanemometer mit kleinen Messunsicherheiten (< 0,8 %) zu kalibrieren, muss nicht nur eine Referenz mit hinreichend kleiner Messunsicherheit für den jeweiligen Anwendungsfall eingesetzt werden, sondern es sollten auch alle für die Messung relevanten Einflussgrößen analysiert und berücksichtigt werden. In Anlehnung an den EURAMET-Leitfaden für thermische Anemometer [10] zählen hierzu u. a.:

- Einfluss des Anemometers auf das Strömungsprofil (Stichwort „Blockage Effect“)
- allgemeine Inhomogenität des Strömungsprofils
- unterschiedliche Positionen von Referenz und Prüfling
- Ausrichtung des Prüflings in der Strömung
- Einfluss der Eintauchtiefe des Prüflings

⁴ Der Erweiterungsfaktor $k = 2$ basiert auf einer Überdeckungswahrscheinlichkeit der Messergebnisse von 95 %. Im Umkehrschluss heißt dies, dass 5 % der Ergebnisse nicht mit anderen vergleichbar sind.

- ggf. Bestimmung der Luftdichte

10.1. Vorangegangene Messreihe in den Jahren 2018/19

Wie beschrieben, wurde im Rahmen des vorangegangenen Ringvergleichs mit einem Staurohr im Zeitraum 2018/19 [9] bereits eine Messreihe mit dem in diesem Ringvergleich verwendeten Flügelradanemometer durchgeführt. Sofern seitens der jeweiligen Akkreditierungsumfänge möglich, sollten dabei folgende Kalibrierpunkte angefahren und abgelesen werden:

| | | | | | |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1 m/s | 2 m/s | 5 m/s | 10 m/s | 20 m/s | 35 m/s |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|

Die Auswertung erfolgte damals nach demselben Prinzip wie in Abschnitt 7 beschrieben. Entsprechend ergaben sich die in der folgenden Tabelle 8 zusammengefassten Referenzwerte für diese Messreihe.

Tabelle 8: Resultierende Referenzwerte y_{RV} für das Flügelradanemometer aus der vorangegangenen Messreihe 2018/19 und deren erweiterte Messunsicherheiten $U(y_{RV})$

| | v_{Nenn} | | | | | |
|--------------------|-------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 m/s | 2 m/s | 5 m/s | 10 m/s | 20 m/s | 35 m/s |
| y_{RV} in m/s | 0,118 | 0,170 | 0,135 | -0,081 | -0,112 | 0,165 |
| $U(y_{RV})$ in m/s | 0,011 | 0,013 | 0,021 | 0,033 | 0,058 | 0,113 |

Der Vergleich dieser Referenzwerte aus Tabelle 8 mit denen des aktuellen Ringvergleichs (s. Tabelle 6) ergibt eine maximale Abweichung von 0,042 m/s (bei 20 m/s). Dies belegt, dass sich das Messverhalten des Flügelradanemometers in der Zwischenzeit nicht signifikant verändert hat, womit die Messreihen von damals und heute vergleichbar sind.

Die für die vorangegangene Messreihe 2018/19 ermittelten E_n -Werte sind mit den in diesem Ringvergleich erzielten Werten (s. Tabelle 7) vergleichbar. Und dies, obwohl zum damaligen Zeitpunkt zusätzliche Messunsicherheitsbeiträge von bis zu 2,5 % für Stabilität und Reproduzierbarkeit des Anemometers berücksichtigt wurden. So zeigt dieser aktuelle Ringvergleich, dass die intensive Analyse der damaligen Auffälligkeiten zu einer effektiven Steigerung der Qualität der Kalibrierergebnisse der einzelnen Laboratorien geführt hat, wodurch sich die Vergleichbarkeit der Teilnehmer untereinander insgesamt verbessert hat.

10.2. Untersuchungen zur Eintauchtiefe des Flügelradanemometers

Die Firma Höntzsch GmbH und Co. KG sowie der DWD am Standort Hamburg-Sasel haben zu einer eventuellen Abhängigkeit des Messergebnisses von der Eintauchtiefe des Flügelradanemometers in die Strömung weiterführende Untersuchungen organisiert. Hierfür wurde im Windkanal Höntzsch-WK320 in 4 cm-Schritten von 8 cm bis 24 cm die Eintauchtiefe des Flügelradanemometers variiert. Und der DWD hat mit einem baugleichen Anemometer eine ähnliche Messreihe in 5 cm-Schritten von 15 cm bis 45 cm durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind detailliert in Anhang B dargestellt.

10.3. Ergänzende Betrachtung zur Messunsicherheit

Effekte wie beispielsweise die Abhängigkeit des Flügelradanemometers vom Einbauwinkel oder von der Eintauchtiefe in die Strömung können einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis haben und sollten daher von einem Kalibrierlabor im Vorhinein untersucht und im jeweiligen Messunsicherheitsbudget berücksichtigt werden. Um zu zeigen, welche Unterschiede sich bereits bei geringen Änderungen der zugrundeliegenden Messunsicherheiten bei Vergleichsmessungen ergeben können, wurde im Rahmen einer zusätzlichen theoretischen Betrachtung das Auswerte-

verfahren wie in Abschnitt 7 beschrieben noch einmal mit einem zusätzlichen fiktiven Messunsicherheitsbeitrag für das Anemometer in Höhe von 0,25 % wiederholt. Die sich hierbei ergebenden E_n -Werte sind nachfolgend in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Theoretische Betrachtung – Übersicht der E_n -Werte für das Flügelradanemometer unter Berücksichtigung eines **zusätzlichen fiktiven Messunsicherheitsbeitrags für das Anemometer in Höhe von 0,25 %**. Die Berechnung basiert auf den Messergebnissen der Teilnehmer und den für die jeweiligen Geschwindigkeitswerte bestimmten Ringvergleichs-Referenzwerten; in Rot dargestellt sind die Werte mit $|E_n| > 1$ (nicht zufriedenstellend/vergleichbar)

| v_{nenn} | 1 m/s | 2 m/s | 5 m/s | 10 m/s | 20 m/s | 30 m/s | 35 m/s |
|-------------------|-------|-------|--------------|--------------|--------|--------|--------|
| | E_n | E_n | E_n | E_n | E_n | E_n | E_n |
| Lab 01 | 0,884 | 0,192 | 0,124 | 0,213 | 0,447 | 0,548 | 0,605 |
| Lab 02 | 0,433 | 0,044 | 0,002 | 0,213 | 0,085 | 0,010 | 0,005 |
| Lab 03 | 0,739 | 0,189 | 0,531 | 0,811 | 0,957 | 0,757 | 0,483 |
| Lab 04 | 0,807 | 0,675 | 0,202 | 0,894 | 0,886 | 0,960 | --- |
| Lab 05 | 0,545 | 0,590 | 0,575 | 1,669 | 0,865 | 0,584 | 0,503 |
| Lab 06 | 0,744 | 0,567 | 1,169 | 2,245 | 0,957 | 0,799 | 0,854 |
| Lab 07 | 0,110 | 0,445 | 0,314 | 0,250 | 0,591 | 0,750 | 0,706 |
| Lab 08 | 0,085 | 0,106 | 0,177 | 0,065 | 0,563 | 0,675 | 0,429 |
| Lab 09 | 0,134 | 0,342 | 0,684 | 0,652 | 0,618 | 0,529 | 0,549 |
| Lab 10 | --- | --- | 0,489 | 0,119 | --- | --- | --- |
| Lab 11 | 0,772 | 0,336 | 0,526 | 0,034 | 0,107 | 0,547 | 0,817 |

Es fällt auf, dass die Anzahl der Werte $|E_n| > 1$ in Tabelle 9 deutlich geringer ausfällt als bei der Auswertung des in diesem Bericht dargestellten Ringvergleichs in Abschnitt 8.2, Tabelle 7 (→ 3 von 71 Messwerten statt 10 von 71 Messwerten). Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass bereits die Berücksichtigung eines geringen zusätzlichen Messunsicherheitsbeitrags ausreicht, um die Vergleichbarkeit der Labore zu verbessern.

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 21/40 |

11. Ausblick auf zukünftige Ringvergleichsmessungen

Wie auch die hier dargestellten Messergebnisse bestätigt haben, stellen Flügelradanemometer höhere Anforderungen an die Kalibrierung als ein Staurohr, wie es bspw. beim vorangegangenen Ringvergleich [9] genutzt wurde. Im Rahmen von weiteren Einflussfaktoranalysen zur Verbesserung der Übereinstimmung der laborübergreifenden Messergebnisse könnten daher zukünftig folgende mögliche Messungen in Betracht gezogen werden:

- Ringvergleich mit Thermoanemometern für kleine und mittlere Geschwindigkeiten.
- Wiederholung des Ringvergleichs mit den bereits in diesem Ringvergleich verwendeten oder ähnlichen Anemometern, um die Wiederholgenauigkeit der Teilnehmer zu analysieren.
- Untersuchungen in Form eines Ringvergleichs mit speziellen Messprotokollen, um die Einflüsse von Bauform und Größe des zu kalibrierenden Sensors auf das Messergebnis zu charakterisieren. (Eintauchtiefe, Blockage-Effekte, Winkel, ...)
- Verwendung weiterer Strömungsmessgeräte mit anderen Geometrien, um deren Einflüsse auf die Messergebnisse zu untersuchen, so dass diese bei Kalibrierungen zukünftig von den Laboren berücksichtigt werden können.

Des Weiteren ist es sinnvoll, Vergleichsmessungen über den gesamten akkreditierten Geschwindigkeitsbereich der Teilnehmer durchzuführen. Dieser Bereich erstreckt sich von 0,1 m/s, ..., 70 m/s. Dabei sollte auf eine sinnvolle Aufteilung der Messbereiche und geeignete Sensoren geachtet werden:

- Vergleichsmessungen beginnend bei 0,1 m/s mit vorzugsweise thermischen Anemometern
- Evtl. Anschaffung/Bereitstellung eines DKD-LDAs für Ringvergleiche im vollen Geschwindigkeitsbereich aller Laboratorien von 0,1 m/s, ..., 70 m/s

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 22/40 |

Referenzen

- [1] DIN EN ISO/IEC 17025 – Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien.
- [2] DIN ISO 13528:2020-09 – Statistische Verfahren für Eignungsprüfungen durch Ringversuche.
- [3] Höntzsch GmbH & Co. KG, „U342_TSR_D_d_190730 - Flügelrad-Strömungssensoren TS und TSR,“ 07 09 2022. [Online].
Available: <https://www.hoentzsch.com/de/messgeraete/detail/27-sonde-ts-tsr-zg1>.
[Zugriff am 14 09 2022].
- [4] EA-4/02 M:2022 – Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
- [5] M. G. Cox, „The evaluation of key comparison data,“ *Metrologia*, pp. 589-595, 2002.
- [6] M. Cox, „The evaluating of key comparison data: determining the largest consistent subset,“ *Metrologia*, pp. 187-200, 2007.
- [7] DIN EN ISO/IEC 17043:2010-05 – Konformitätsbewertung – Allgemeine Anforderungen an Eignungsprüfungen.
- [8] F. Härtig und K. Kniel, „Valuable Advices on Comparison Rules for Unambiguous Evaluation of Measurement Results,“ in *XX IMEKO World, Congress - Metrology for Green Growth*, Busan, 2012.
- [9] Vergleichsbericht DKD-V 11-2 DKD-Ringvergleich: Strömungsgeschwindigkeit, Staurohr ohne Messequipment, Kalibrierpunkte 1 m/s bis 50 m/s, Braunschweig und Berlin: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 02/2020.
- [10] EURAMET e. V., Technical Committee for Flow, „Guidelines on the Calibration of Solid Anemometers Part 2: Thermal Anemometers,“ EURAMET Calibration Guide No. 25, 02/2021.
- [11] H. Müller, N. Pape, T. Sodomann, J. Kampe und D. Dopheide, „Einsatz der Laser-Doppler-Anemometrie für die Kalibrierung von Anemometern in Windkanälen,“ *Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik"*, September 2006.
- [12] EURAMET e. V., Technical Committee for Flow, „Guidelines on the Calibration of Solid Anemometers Part 1: Pitot Static Tubes,“ EURAMET Calibration Guide No. 24, 02/2021.
- [13] Measuring-Network of Wind Energy Institutes measnet, „ANEMOMETER CALIBRATION PROCEDURE,“ Nr. 2, October 2009.
- [14] DIN EN 61400-12-1 VDE 0127-12-1:2017-12, „Teil 12-1: Messung des Leistungsverhaltens von Windenergieanlagen (IEC 61400-12-1:2017); Deutsche Fassung EN 61400-12-1:2017,“ 2017-12.

Anhang A – Ergebnisse der Kompatibilitätsprüfung

Tabelle 10: Ergebnisse des Chi-Quadrat-Tests für das Flügelradanemometer; in Rot: Werte, die für die Berechnung des Referenzwertes nicht mitberücksichtigt wurden.

| V _{Nenn} [m/s] | y _{rv} [m/s] | $(\chi_{\text{obs}})^2$ | | | | | | | | | | Summe | χ^2 -Test | | |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|----------------|--------|--------|
| | | Lab 01 | Lab 02 | Lab 03 | Lab 04 | Lab 05 | Lab 06 | Lab 07 | Lab 08 | Lab 09 | Lab 10 | | | Lab 11 | |
| 1 | 0,102 | 0,78 | 0,67 | 1,36 | 1,23 | 0,58 | 0,88 | 0,01 | 0,01 | 0,05 | 0,05 | 2,00 | 7,57 | 16,92 | Passed |
| 2 | 0,192 | 0,22 | 0,00 | 0,02 | 0,97 | 0,83 | 0,80 | 0,42 | 0,01 | 0,40 | 0,40 | 0,49 | 4,16 | 16,92 | Passed |
| 5 | 0,159 | 0,45 | 0,00 | 0,92 | 0,12 | 1,35 | 5,30 | 0,34 | 0,15 | 1,79 | 0,90 | 0,96 | 12,28 | 18,31 | Passed |
| 10 | -0,046 | 1,56 | 0,05 | 10,62 | 0,91 | 9,63 | 21,51 | 0,07 | 0,43 | 4,04 | 1,08 | 2,14 | 52,04 | 18,31 | Failed |
| | -0,068 | 0,25 | 0,02 | 6,21 | 2,13 | 14,89 | (28,97) | 0,02 | 0,05 | 2,73 | 0,38 | 0,40 | 27,08 | 16,92 | Failed |
| 20 | -0,090 | 0,06 | 0,24 | 2,95 | 3,87 | (21,37) | (37,64) | 0,34 | 0,04 | 1,66 | 0,03 | 0,04 | 9,24 | 15,51 | Passed |
| | -0,028 | 1,06 | 0,02 | 5,66 | 3,57 | 4,05 | 4,97 | 1,80 | 1,68 | 1,75 | 0,04 | 0,04 | 24,60 | 16,92 | Failed |
| 30 | -0,046 | 0,49 | 0,09 | 4,18 | 4,45 | 5,51 | (6,55) | 1,25 | 1,13 | 1,38 | 0,42 | 0,42 | 18,90 | 15,51 | Failed |
| | -0,070 | 0,08 | 0,24 | 2,65 | 5,68 | (7,63) | (8,84) | 0,71 | 0,59 | 0,97 | 1,49 | 1,49 | 12,41 | 14,07 | Passed |
| 35 | 0,152 | 1,82 | 0,00 | 3,34 | 3,96 | 1,55 | 3,01 | 2,76 | 2,42 | 1,30 | 1,57 | 1,57 | 21,75 | 16,92 | Failed |
| | 0,136 | 1,36 | 0,00 | 2,71 | (4,48) | 2,04 | 3,67 | 2,38 | 1,99 | 1,11 | 2,28 | 2,28 | 17,53 | 15,51 | Failed |
| 35 | 0,110 | 0,76 | 0,03 | 1,82 | (5,38) | 2,97 | (4,89) | 1,81 | 1,38 | 0,83 | 3,69 | 3,69 | 13,29 | 14,07 | Passed |
| | 0,207 | 0,32 | 0,00 | 0,22 | 0,09 | 0,32 | 0,48 | 0,48 | 0,19 | 0,36 | 0,26 | 0,26 | 2,25 | 15,51 | Passed |

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 24/40 |

Anhang B – Darstellung der Messwerte zur Eintauchtiefen-Untersuchung

Die Eintauchtiefenabhängigkeit wurde beim DWD bei den verschiedenen Geschwindigkeiten des Ringvergleichs in 5 cm-Schritten von 15 cm bis 45 cm Eintauchtiefe untersucht. Betrachtet man die Eintauchtiefe absolut, so können die Eintauchtiefen von 8 cm bis 45 cm mit einer Überlappung von DWD und Höntzsch im Bereich von 15 cm und 25 cm dargestellt werden (s. Abbildung 5).

Die LDA-Position blieb bei allen Messungen unverändert. Die Messwernerfassung des Flügelradanemometers erfolgte jeweils sekundlich über einen Zeitraum von einer Minute.

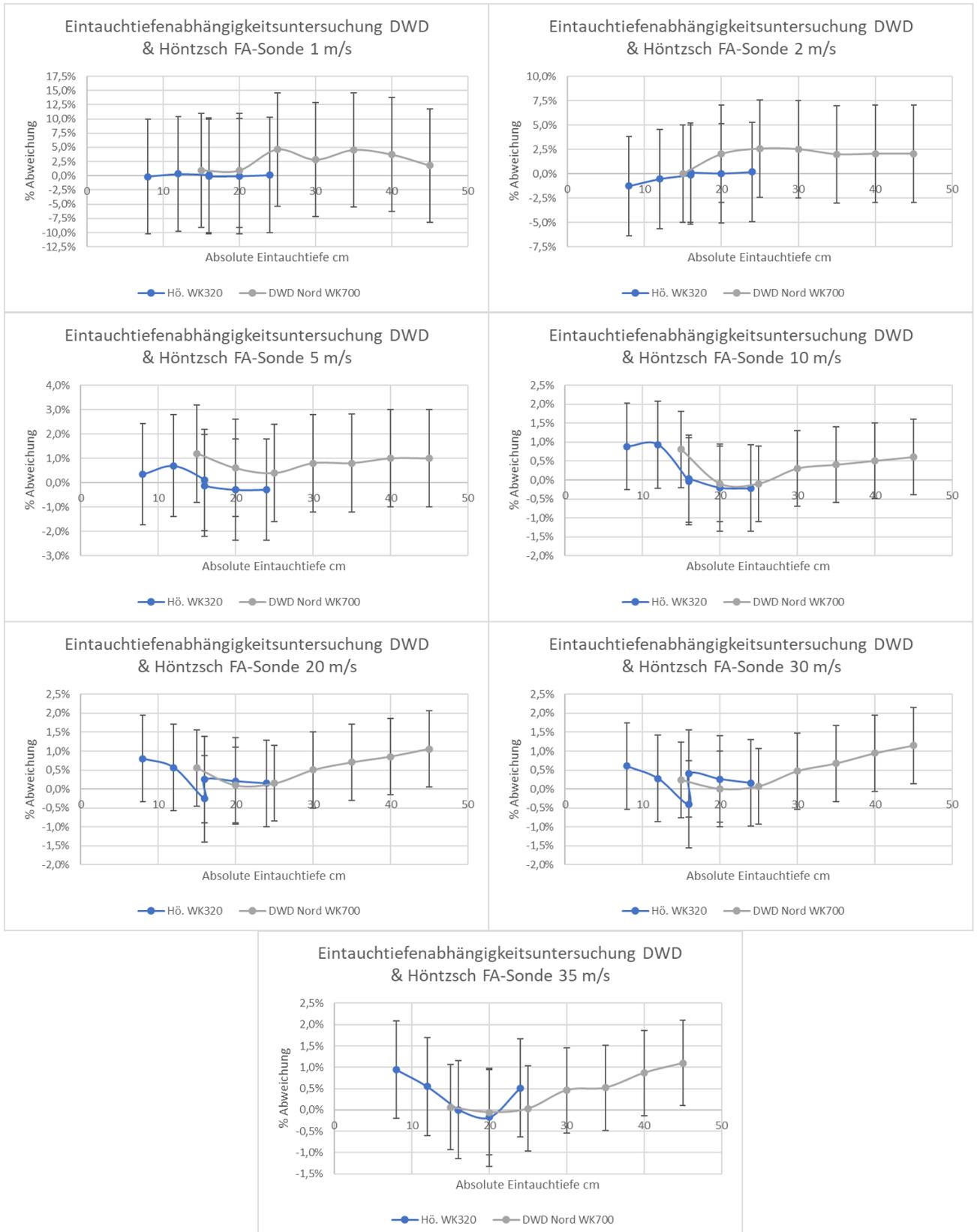


Abbildung 5: Zusammenfassung DWD/Höntzsch-Untersuchung zur Abhängigkeit des Flügelradanemometers von der Eintauchtiefe: Prozentuale Abweichungen unter Bezugnahme auf die absolute Eintauchtiefe bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Berücksichtigung der Messunsicherheit.

Tabelle 11: Zusammenfassung DWD/Höntzsch-Untersuchung zur Abhängigkeit des Flügelradanemometers von der Eintauchtiefe: Mittlere prozentuale Abweichung mit Wiederholbarkeit und Abweichung davon bezogen auf die verschiedenen Eintauchtiefen

| mittl. Abweichung | | 1,5% | 0,9% | 0,5% | 0,3% | 0,4% | 0,4% | 0,4% | |
|--------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| MU aus Stabw. LDA und Prüfling | | 1,1% | 0,8% | 0,3% | 0,3% | 0,2% | 0,3% | 0,3% | |
| MU-Labor | Hö. | 1,0% | 0,5% | 0,5% | 0,5% | 0,5% | 0,5% | 0,5% | |
| | DWD | 10,0% | 5,0% | 2,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% | |
| MU kombiniert | | 10,1% | 5,1% | 2,1% | 1,1% | 1,1% | 1,1% | 1,1% | |
| Absolute Eintauchtiefe | Eintauchtiefe ab Mittenposition | 1 m/s | 2 m/s | 5 m/s | 10 m/s | 20 m/s | 30 m/s | 35 m/s | Datenursprung |
| cm | cm | | | | | | | | |
| 8 | -8 | -0,2% | -1,3% | 0,4% | 0,9% | 0,8% | 0,6% | 0,9% | Hö. |
| 12 | -4 | 0,3% | -0,5% | 0,7% | 0,9% | 0,6% | 0,3% | 0,5% | Hö. |
| 15 | -20 | 0,9% | 0,0% | 1,2% | 0,8% | 0,6% | 0,2% | 0,1% | DWD |
| 16 | 0 | 0,1% | -0,1% | 0,1% | 0,0% | -0,3% | -0,4% | 0,0% | Hö. |
| 20 | 4 | -0,1% | 0,0% | -0,3% | -0,2% | 0,2% | 0,3% | -0,2% | Hö. |
| 20 | -15 | 0,9% | 2,0% | 0,6% | -0,1% | 0,1% | 0,0% | -0,1% | DWD |
| 24 | 8 | 0,1% | 0,2% | -0,3% | -0,2% | 0,2% | 0,2% | 0,5% | Hö. |
| 25 | -10 | 4,6% | 2,6% | 0,4% | -0,1% | 0,2% | 0,1% | 0,0% | DWD |
| 30 | -5 | 2,8% | 2,5% | 0,8% | 0,3% | 0,5% | 0,5% | 0,5% | DWD |
| 35 | 0 | 4,5% | 2,0% | 0,8% | 0,4% | 0,7% | 0,7% | 0,5% | DWD |
| 40 | 5 | 3,7% | 2,1% | 1,0% | 0,5% | 0,9% | 0,9% | 0,9% | DWD |
| 45 | 10 | 1,8% | 2,1% | 1,0% | 0,6% | 1,1% | 1,1% | 1,1% | DWD |

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 27/40 |

Anhang C – Prüfstände und Kalibrierverfahren der einzelnen Teilnehmer

Zur Verdeutlichung der in diesem Ringvergleich eingesetzten Kalibrierverfahren für das Flügelradanemometer hat jeder Teilnehmer sein labortypisches Verfahren zur Flügelradanemometer-Kalibrierung gemeinsam mit einer Beschreibung des Windkanals und mit einem optionalen Bild vom Messaufbau im Windkanal zusammengefasst.

| | |
|---|----|
| C.1. Höntzsch: Prüfstand und Kalibrierverfahren | 28 |
| C.2. Deutscher Wetterdienst (Süd): Prüfstand und Kalibrierverfahren..... | 29 |
| C.3. Testo Industrial Services: Prüfstand und Kalibrierverfahren | 30 |
| C.4. Airflow Lufttechnik GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren | 31 |
| C.5. Westenberg Engineering: Prüfstand und Kalibrierverfahren | 32 |
| C.6. E+E: Prüfstand und Kalibrierverfahren | 33 |
| C.7. Luft Mess- und Regeltechnik GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren..... | 33 |
| C.8. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren..... | 35 |
| C.9. Deutscher Wetterdienst (Nord): Prüfstand und Kalibrierverfahren..... | 36 |
| C.10. Ammonit Wind Tunnel GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren | 37 |
| C.11. Deutsche WindGuard Wind Tunnel Services GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren..... | 38 |

C.1. Höntzsch: Prüfstand und Kalibrierverfahren

C.1.1. DAkkS-akkreditierte Messungen im Freistrah-Windkanal (WK320)

Der Freistrah-Windkanal (WK320) der Höntzsch GmbH & Co. KG ist ein Kanal nach Göttinger Bauart (Typ 83260 G). Konstruiert und gefertigt wurde er durch die Fa. Westenberg Engineering.

Die Strömungsgeschwindigkeit kann stufenlos im Bereich von 0,1 m/s bis 70 m/s geregelt werden. Der Düsenaustrittsdurchmesser beträgt 320 mm bei einer Kontraktion von acht. Die offene Messtrecke 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 & Co. KG kommt ein LDA-System der Fa. ILA R&D GmbH zur Anwendung, welches in sog. Rückstreuanordnung im Bereich von 0,1 m/s bis 70 m/s mit einer bei der PTB kalibrierten erweiterten Messunsicherheit von 0,14 % misst.

C.1.2. Beschreibung Höntzsch-Kalibrierverfahren Flügelradanemometer

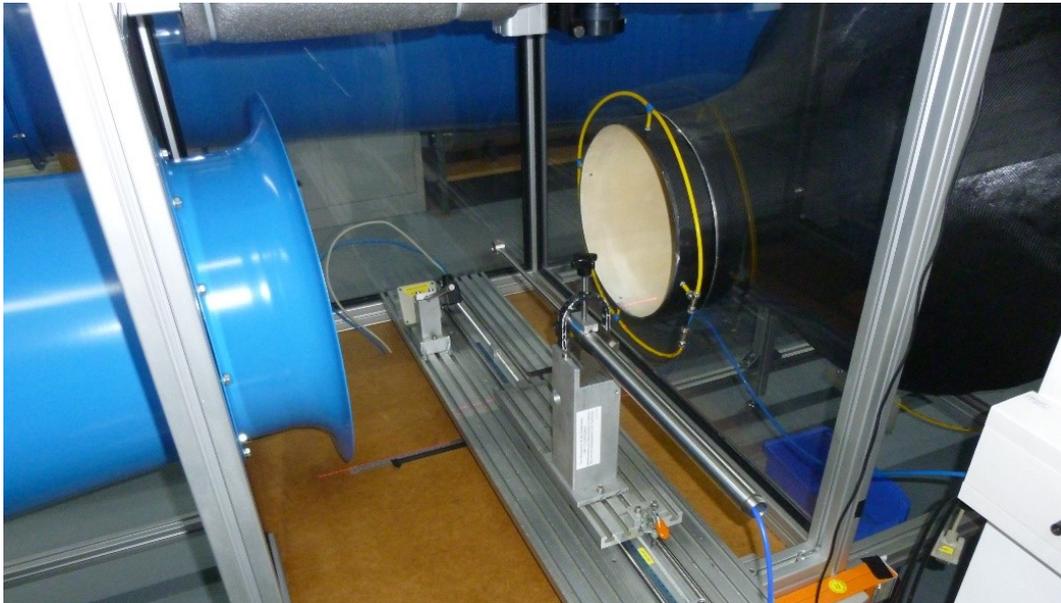


Abbildung 6: Flügelradanemometer in der Messkammer des Höntzsch-Windkanals. Das LDA befindet sich oben rechts.

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. Der Austrittsdurchmesser der Düse beträgt 320 mm. Als Referenz dient ein LDA mit seinem Messpunkt 35 mm vom Düsenaustritt und 60 mm oberhalb und 55 mm abseits der Strahlachse. Hier werden jeweils 200 Bursts pro Geschwindigkeit aufgenommen. Die Messwerte des Prüflings werden mittels elektronischer Datenerfassung über eine Messzeit von 60 s aufgenommen. Davon werden die Standardmessunsicherheit und der Mittelwert errechnet. Dieser Mittelwert wird mit der vom LDA bestimmten Geschwindigkeit, die mittels Windkanal-Korrekturfaktoren [11] auf die Prüflingsposition umgerechnet wird, verglichen.

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 29/40 |

C.2. Deutscher Wetterdienst (Süd): Prüfstand und Kalibrierverfahren

C.2.1. Beschreibung des Windkanals vom Deutschen Wetterdienst am Standort Oberschleißheim bei München

Der Deutsche Wetterdienst betreibt am Standort Oberschleißheim einen Windkanal gemäß Göttinger Bauart. Die Strömungsgeschwindigkeit kann stufenlos im Bereich von 0,1 m/s bis 62 m/s geregelt werden. Der Windkanal hat einen runden Düsenaustritt mit einem Durchmesser von 1000 mm bei einem Kontraktionsverhältnis von 6 zu 1. Die offene Messstrecke ist 1820 mm lang. Für einen mittigen Ausschnitt von 500 mm · 500 mm beträgt der Turbulenzgrad bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 50 m/s etwa 0,2 %. Der Windkanal erstreckt sich über das Kellergeschoss und das Erdgeschoss auf einer Länge von 17 m und einer Höhe von 5,98 m.

Als Referenzsystem für die Strömungsgeschwindigkeit kommt ein LDA-System der Firma Dantec Dynamics mit einer von der PTB kalibrierten erweiterten Unsicherheit von 0,18 % ($k = 2$) zum Einsatz. Für die Kalibrierung von Sensoren zur Messung der Strömungsrichtung ist der Windkanal mit einem Präzisionsdrehtisch der Firma OWIS ausgestattet, womit Anströmrichtungen von 0° bis 360° erreicht werden können.

Der Deutsche Wetterdienst wurde für die Strömungsgeschwindigkeit von Gasen im Bereich von 0,15 m/s bis 50 m/s mit einer erweiterten Messunsicherheit von 1 %, jedoch nicht kleiner als 0,1 m/s akkreditiert. Für die Geschwindigkeitsrichtung im Bereich von 0° bis 360° beträgt die erweiterte Messunsicherheit 0,9°.

C.2.2. Beschreibung DWD-Kalibrierung Flügelradanemometer

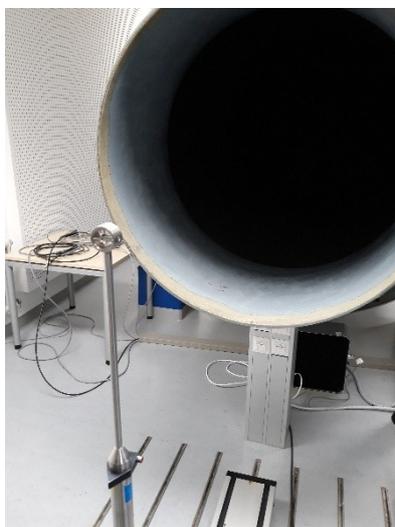


Abbildung 7: Flügelradanemometer in Messkammer des DWD-(Süd)-Windkanals.

Der Referenzwert der Strömungsgeschwindigkeit wird mit dem LDA gemessen. Die Messposition ist 170 mm vom Düsenaustritt entfernt in der Windkanalmitte. Das Flügelradanemometer wird 900 mm vom Düsenaustritt entfernt ebenfalls in der Windkanalmitte aufgebaut. Für eine Messdauer von 100 s wird alle 10 s ein Wert vom Anzeigegerät ablesen und notiert. Aus den 10 Messwerten wird ein Mittelwert gebildet. Parallel wird mit dem LDA über 100 s die Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal ermittelt. Dieser Wert wird anhand eines DWD-Hausverfahrens korrigiert und entspricht dann dem eigentlichem Referenzwert. Mit Hilfe einer Auswertesoftware werden aus den Aufzeichnungen für das Flügelradanemometer und den Messwerten des LDA die entsprechenden Mittelwerte mit den beigeordneten Messunsicherheiten berechnet und ein Kalibrierschein erstellt.

C.3. Testo Industrial Services: Prüfstand und Kalibrierverfahren

C.3.1. Freistrah-Windkanal (WK832060) der Testo Industrial Services GmbH

Der Freistrah-Windkanal (WK832060) der Testo Industrial Services GmbH ist ein Kanal Göttinger Bauart (Typ 832060 G). Konstruiert und gefertigt wurde er durch die Fa. Westenberg Engineering.

Die Strömungsgeschwindigkeit kann stufenlos im Bereich von 0,1 bis 68 m/s geregelt werden. Der Düsenaustrittsdurchmesser beträgt 320 mm bei einer Kontraktion von acht. Die Messstrecke ist 470 mm lang und der Turbulenzgrad liegt zwischen 0,3%, ..., 0,5 % (bei 20 m/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 m/s bis 68 m/s mit einer bei der PTB kalibrierten erweiterten Messunsicherheit, einer Abweichung des Interferenzstreifens über dem Messvolumen, von ca. 0,13 % misst.

C.3.2. Beschreibung Testo-Kalibrierverfahren

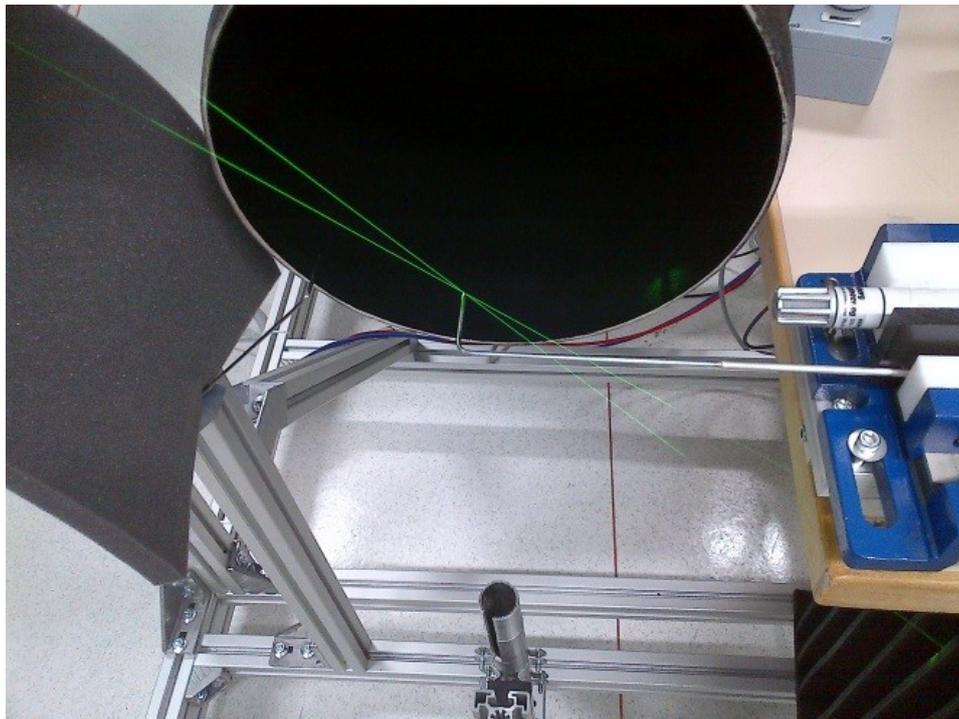


Abbildung 8: Beispiel einer Staurohrkalibrierung im Zentrum des Freistrahls des Testo-Windkanals.

Die Strömungsgeschwindigkeit wird einerseits mit dem Kalibriergegenstand und andererseits mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) gemessen. Die Kalibrierposition des Sensorkopfes im Windkanal ist 100 mm vom Düsenaustritt entfernt in der Strahlmitte. Der Austrittsdurchmesser der Düse beträgt 320 mm. Als Referenz dient ein LDA mit seinem Messpunkt im Zentrum des Freistrahls im Abstand von der Düse von 100 mm. Hier werden 1000 Bursts (oder 20 s) pro Geschwindigkeit aufgenommen. Die Messung erfolgt nacheinander. Aus 10 hintereinander im Abstand von 5 s abgelesenen Messwerten des Prüflings werden die erweiterte Standardmessunsicherheit und der Mittelwert errechnet. Dieser Mittelwert wird mit der vom LDA bestimmten Geschwindigkeit verglichen.

C.4. Airflow Lufttechnik GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren

C.4.1. DAkkS-akkreditierte Messungen für Strömungssonden bis 50 mm Durchmesser im Windkanal Typ MK II

Der Windkanal der Airflow Lufttechnik GmbH ist ein 150 mm Kanal Type MK II gefertigt durch die Fa. Westenberg Engineering. Die Strömungsgeschwindigkeit kann stufenlos im Bereich 0,1 m/s bis 30 m/s geregelt werden. Der Austrittsdurchmesser für die DAkkS-Kalibrierungen beträgt 75 mm. Der Turbulenzgrad liegt bei 0,7 %. Der Aufbau ist horizontal mit den Dimensionen Durchmesser 0,3 m, Länge 5500 mm.

Bei der Airflow Lufttechnik GmbH kommt ein LDA-System der Fa. ILA R&D GmbH zur Anwendung, welches in sog. Rückstreuanordnung im Bereich von 0,1 m/s bis 30 m/s misst. Das verwendete akkreditierte Verfahren hat eine kleinste angebbare Messunsicherheit von 0,8 % vom Messwert, jedoch nicht kleiner als 0,01 m/s.

C.4.2. Beschreibung Airflow-Kalibrierverfahren

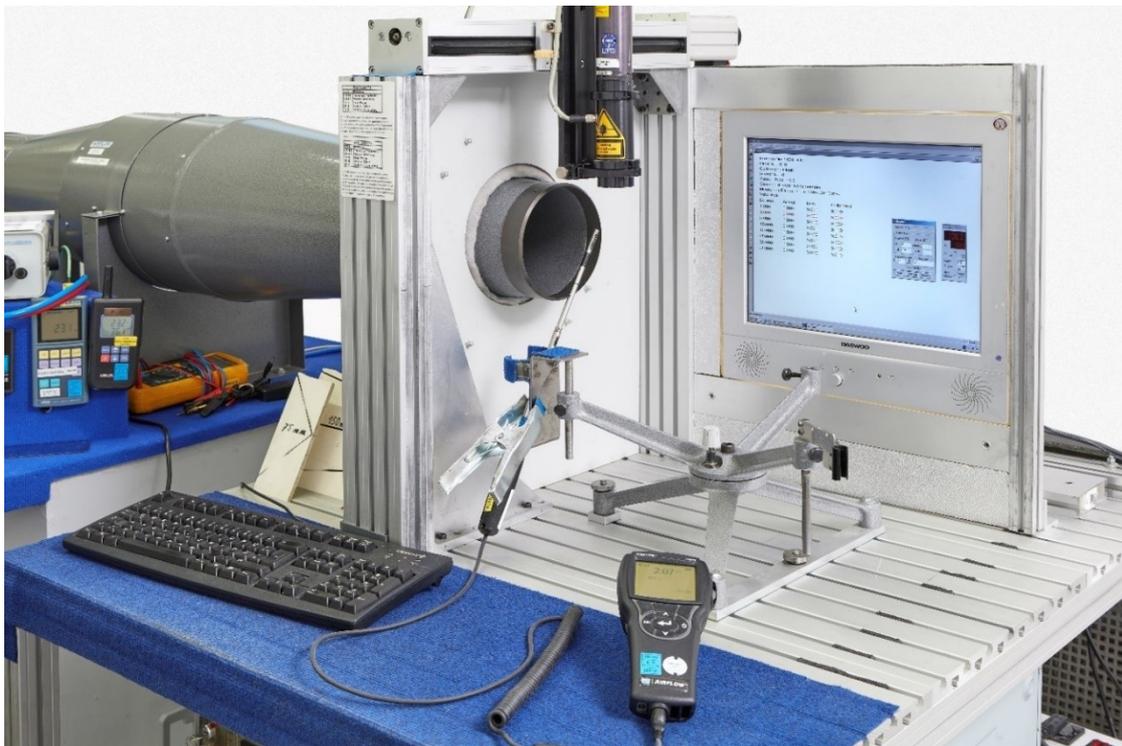


Abbildung 9: Flügelradanemometer in der Airflow-Messkammer. Das LDA ist oben in der Mitte fixiert.

Die Strömungsgeschwindigkeit wird einerseits mit dem Kalibriergegenstand und andererseits mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) gemessen. Die Kalibrierposition des Sensor Kopfes im Windkanal ist 75 mm vom Düsenaustritt entfernt in der Strahlmitte. Der Austrittsdurchmesser der Düse beträgt 75 mm. Als Referenz dient ein LDA mit seinem Messpunkt 75 mm vom Düsenaustritt und mittig der Strahlachse. Hier werden jeweils 150 Bursts pro Geschwindigkeit aufgenommen. Die Messwerte des Prüflings werden mittels elektronischer Datenerfassung über eine Messzeit von 120 s aufgenommen. Davon werden die erweiterte Standardmessunsicherheit und der Mittelwert errechnet. Dieser Mittelwert wird mit der vom LDA bestimmten Geschwindigkeit, die mittels Windkanal-Korrekturfaktoren [11] auf die Prüflingsposition umgerechnet wird, verglichen.

C.5. Westenberg Engineering: Prüfstand und Kalibrierverfahren

C.5.1. Kalibrierung im Windkanal WK 25540-G

| | |
|---|---|
| Düsenaustritt | Ø 255 mm |
| Kontraktionsverhältnis | 4:1 |
| Geschwindigkeit | 0,1 m/s bis 40 m/s |
| Referenz | Laser-Doppler-Anemometer, Fa. ILA |
| mittlerer Streifenabstand im Messvolumen des Lasers | $\Delta x_{\text{mitt}} = 3,514 \mu\text{m}$ |
| relative Unsicherheit | $U = 0,13 \%$ |
| Position des Messvolumens des LDAs | 40 mm vom Düsenaustritt entfernt 45 mm über und 45 mm neben der Düsenachse |
| Länge der Messstrecke | 360 mm |
| Position des Prüflings | 150 mm vom Düsenaustritt entfernt |

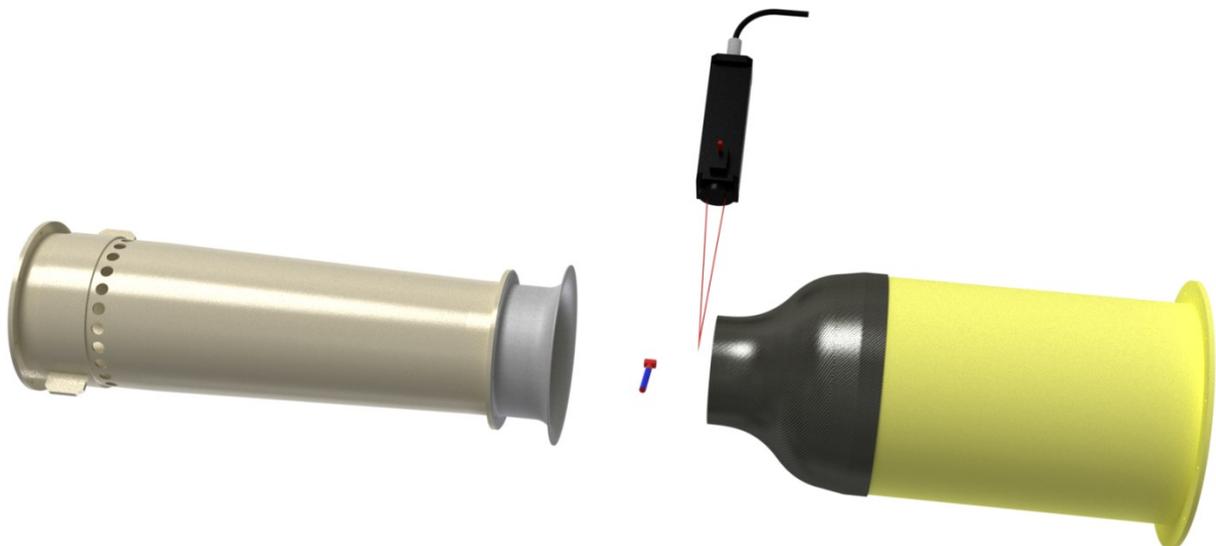


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Flügelradanemometers in der Messkammer des WK 25540-G von Westenberg.

C.5.2. Beschreibung Westenberg-Kalibrierverfahren

Vergleichsmessung von Luftgeschwindigkeiten des Kalibriergegenstandes im Windkanal. Die Kalibrierposition des Sensorkopfes im Windkanal ist 150 mm vom Düsenaustritt entfernt. Der Sensorkopf befindet sich in der Düsenmitte. Der Austrittsdurchmesser der Düse beträgt 255 mm. Als Referenz dient ein Laser-Doppler-Anemometer. Es werden bei der LDA-Messung jeweils 500 Bursts pro Geschwindigkeit aufgenommen.

Der Mittelwert des Prüflings wird aus 10 hintereinander, im Abstand von 10 s, abgelesenen Messwerten errechnet. Die erweiterte Messunsicherheit des Prüflings setzt sich zusammen aus der erweiterten Messunsicherheit und der Auflösung der Anzeige des Prüflings.

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 33/40 |

C.6. E+E: Prüfstand und Kalibrierverfahren

C.6.1. Beschreibung des Windkanals

Es gibt zwei Windkanäle mit folgenden Bereichen:

- 1) WK40: 0,3 m/s bis 40 m/s (5°C bis 80 °C)
- 2) WK2: 0,04 m/s bis 2 m/s (23°C ± 3°C)

Für beide Windkanäle gilt eine akkreditierte erweiterte Messunsicherheit von $0,004 \text{ m/s} + 0,0047 \cdot v$ ($k=2$).

C.6.2. Beschreibung E+E-Kalibrierverfahren

Das Kalibrierverfahren entspricht jenem, das in den beiden Euramet-Richtlinien [12] und [10] beschrieben ist.

C.7. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren

C.7.1. DAKS-akkreditierte Messungen im Freistrah-Windkanal (WK 825550-G)

Der Freistrah-Windkanal (WK 825550-G) der Lufft GmbH ist ein Kanal gemäß Göttinger-Bauart. Konstruiert und gefertigt wurde er durch die Fa. Westenberg Engineering. Die Strömungsgeschwindigkeit kann stufenlos im Bereich 0,1 m/s bis 55 m/s geregelt werden. Die geometrischen Charakteristika des Windkanals lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Düsenaustrittsdurchmesser beträgt 255 mm.
- Die offene Messtrecke ist 350 mm lang.
- Die Eintauchtiefe des Sensorkopfes beträgt 127 mm (Strahlmitte); der Abstand der Strahlmitte vom Boden ist 1010 mm.
- Der Aufbau ist horizontal mit den Dimensionen:
 - Höhe: 1400 mm,
 - Breite: 1700 mm,
 - Länge: 4600 mm.

Bei der Lufft GmbH kommt ein LDA-System der Fa. ILA R&D GmbH zur Anwendung, welches in sog. Rückstreuanordnung im Bereich von 0,1 m/s bis 55 m/s mit einer bei der PTB kalibrierten Genauigkeit des dort ermittelten Streifenabstandes von 3,525 µm mit einer erweiterten MU von 0,13 % misst.

C.7.2. Beschreibung Luft-Kalibrierverfahren

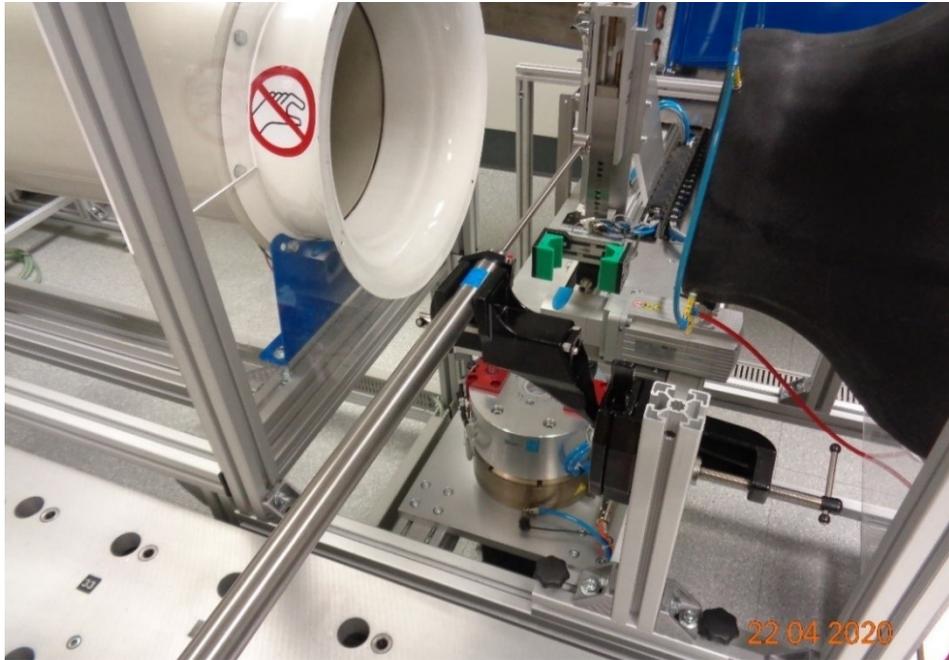


Abbildung 11: Aufbau eines Flügelradanemometers im Windkanal der Luft Mess- und Regeltechnik GmbH

Die Strömungsgeschwindigkeit wird einerseits mit dem Kalibriergegenstand und andererseits mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) gemessen. Die **Kalibrierposition des Sensorkopfes des Kalibriergegenstandes** im Windkanal ist 140 mm vom Düsenaustritt entfernt in der Strahlmitte. Der Austrittsdurchmesser der Düse beträgt 255 mm.

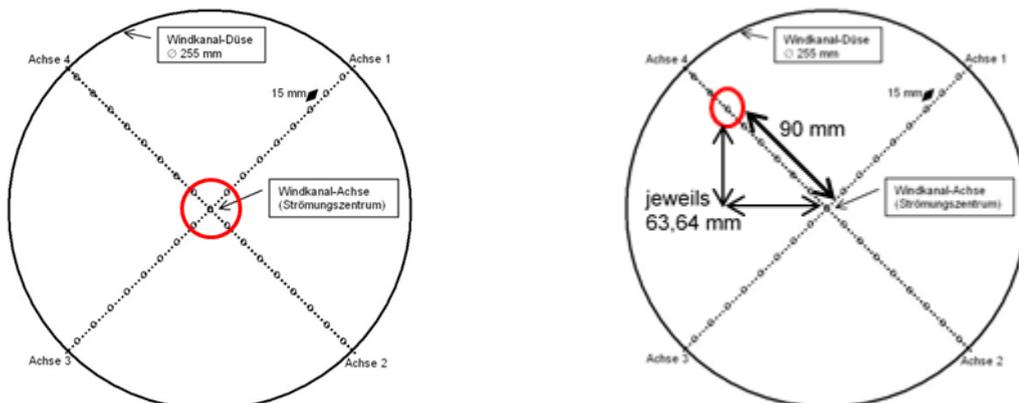


Abbildung 12: Position Kalibriergegenstand (links) und Position Bezugsnorm LDA (rechts) bei Luft Mess- und Regeltechnik GmbH

Als Referenz dient ein LDA mit dem in der Abbildung 12 dargestellten Messpunkt. Hier werden jeweils typischerweise 500 bis 1000 Bursts pro Geschwindigkeit aufgenommen. Für die Messdauer je Messung werden mindestens 10 s gewählt, jede Messung wird zehnmals wiederholt und aus diesen Messwerten jeweils ein arithmetischer Mittelwert mit zugehöriger Standardabweichung berechnet. Davon werden die erweiterte Messunsicherheit und der Mittelwert errechnet. Dieser

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 35/40 |

Mittelwert wird mit der vom LDA bestimmten Geschwindigkeit, die mittels Windkanal-Korrekturfaktoren auf die Prüflingsposition umgerechnet wird, verglichen.

C.8. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren

C.8.1. DAkkS-akkreditiertes Kalibrierlaboratorium für Strömungsgeschwindigkeit; Prüfstand und Kalibrierverfahren

Der Windkanal der Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH ist ein Freistrah-Windkanal gemäß Göttinger-Bauart vom Typ 83260-G. Konstruiert und gefertigt wurde er durch die Firma Westenberg Engineering. Der Aufbau ist vertikal mit den Dimensionen: Länge 7000 mm, Höhe 3125 mm, Breite 1840 mm. Die Messtrecke ist 468 mm lang und der Turbulenzgrad liegt zwischen 0,3 %, ..., 0,5 %. Die Strömungsgeschwindigkeit kann stufenlos im Bereich 0,1 m/s bis 70 m/s geregelt werden. Der Düsenaustrittsdurchmesser beträgt 320 mm bei einer Kontraktion von acht.

Als rückgeführtes Referenzmesssystem kommt ein in der PTB kalibriertes LDA-System vom Typ Dantec-FlowExplorer in Rückstreuanordnung zur Anwendung.

C.8.2. Beschreibung Ahlborn-Kalibrierverfahren

Der Kalibriergegenstand ist mit seiner Messspitze auf dem Prüflings-Messpunkt positioniert. Die kalibrierten Kompensationsfühler (Temperatur, Feuchte, Luftdruck) befinden sich im Luftstrom.

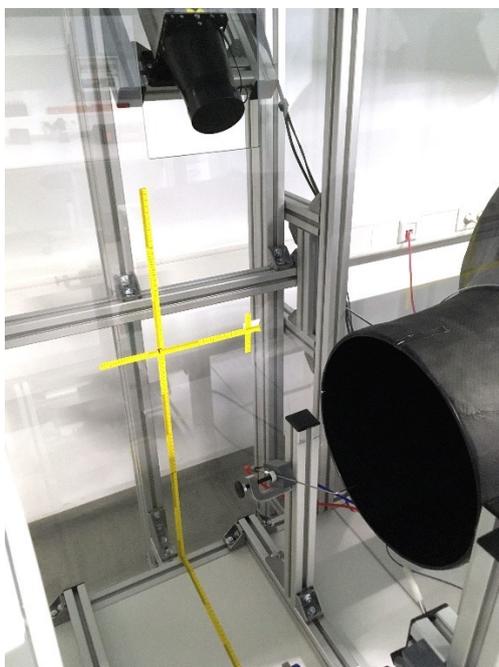


Abbildung 13: Ahlborn-Messkammer mit LDA (oben in der Mitte)

Die Strömungsgeschwindigkeit wird mit dem Kalibriergegenstand und dem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) gemessen. Der Prüfling wird in der Düsenmitte installiert. Die Kalibrierposition des Prüflings im Windkanal ist 180 mm vom Düsenaustritt entfernt. Der Austrittsdurchmesser der Düse beträgt 320 mm. Als Referenz dient ein LDA mit seinem Messpunkt 47 mm vom Düsenaustritt und 57 mm oberhalb und abseits der Düsenmitte.

Es werden jeweils mindestens 500 Bursts pro Geschwindigkeit über den Zeitraum von 60 s (Abfragezyklus: 2 s) aufgenommen. Die Messwerte des Prüflings werden ebenfalls 60 s lang

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 36/40 |

aufgezeichnet, anschließend werden daraus der Mittelwert und die erweiterte Standardmessunsicherheit errechnet. Dieser Mittelwert wird mit der vom LDA bestimmten, auf die Prüflingsposition korrigierten Geschwindigkeit, verglichen.

C.9. Deutscher Wetterdienst (Nord): Prüfstand und Kalibrierverfahren

C.9.1. Beschreibung des Windkanals vom Deutschen Wetterdienst am Standort Hamburg-Sasel

| | |
|--------------------------|---|
| Hersteller: | Zentralwerkstatt der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen |
| Baujahr: | 1974, 1975 Generalüberholung des Antriebes 2006 |
| Maximalgeschwindigkeit: | 65 m/s ohne Kalibriergegenstand, Minimum 0,1 m/s |
| Durchmesser Düse: | 1,05 m · 0,7 m |
| Durchmesser Kollektor: | 1,0 m |
| Form Düse und Kollektor: | Düse oval, Kollektor rund |
| Pos. Gebläse und Motor: | Gebläse vor dem ersten Knick, Antrieb außerhalb mittels DC-Motor und Bandriemen |
| Kontraktionsverhältnis: | 4,8 zu 1 |
| Turbulenzgrad: | Bei 50 ms ⁻¹ wurden etwa 0,5 % ermittelt, sonst < 1 % |
| Flügelverstellung: | vorhanden, aber nicht genutzt. Anstellwinkel derzeit 32° |
| Länge der Messstrecke: | 1,40 m |

Die Kalibrierung der Sonden erfolgt wie in Oberschleißheim. Die Kalibriergegenstände werden mittig im Freistrahle positioniert (s. C.2.2. Beschreibung DWD-Kalibrierung Flügelradanemometer). Als Referenzsystem für die Strömungsgeschwindigkeit kommt ein LDA-System der Firma Dantec Dynamics mit einer von der PTB kalibrierten erweiterten Unsicherheit von 0,22 % ($k = 2$) zum Einsatz. Für die Kalibrierung von Sensoren zur Messung der Strömungsrichtung ist der Windkanal mit einem Präzisionsdrehtisch der Firma OWIS ausgestattet, womit Anströmrichtungen von 0° bis 360° erreicht werden können.

Der Deutsche Wetterdienst wurde für die Strömungsgeschwindigkeit von Gasen im Bereich von 0,15 m/s bis 50 m/s mit einer erweiterten Messunsicherheit von 1 %, jedoch nicht kleiner als 0,1 m/s akkreditiert. Für die Geschwindigkeitsrichtung im Bereich von 0° bis 360° beträgt die erweiterte Messunsicherheit 0,9°.

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 37/40 |

C.10. Ammonit Wind Tunnel GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren

C.10.1. DAkkS-akkreditierte Messungen im Windkanal

Der Windkanal der Ammonit Wind Tunnel GmbH ist ein Kanal gemäß Göttinger-Bauart mit halboffener Messstrecke. Konstruiert und gefertigt wurde der Windkanal von der Baltic Windtunnel GmbH, Lüssow. Maßgeblich beim Design des Windkanals war die Eignung für die Kalibrierung von Anemometern gemäß der MEASNET-Richtlinie [13] und IEC 61400-12-1 Ed. 2 [14]. Der Windkanal befindet sich in einer beheizbaren Halle.

Zur Sicherstellung der geforderten Homogenität der Strömung ist der Windkanal mit einer Beruhigungskammer bestehend aus einem Wabengitter und vier Sieben mit unterschiedlichen Maschenweiten und Drahtdurchmesser ausgestattet. Die Strömungsgeschwindigkeit kann stufenlos im Bereich von 2 m/s bis 30 m/s geregelt werden. Der Düsenaustritt ist quadratisch mit einer Seitenlänge von 1200 mm. Hieraus ergibt sich für den Windkanal ein Kontraktionsverhältnis von 9:1. Die offene Messstrecke ist ca. 2 m lang und der Turbulenzgrad liegt unter 1 %. Der Aufbau ist horizontal mit den Dimensionen: Höhe ca. 4 m, Breite ca. 7 m, Länge ca. 18 m.

Bei der Ammonit Wind Tunnel GmbH kommt ein Messsystem mit Prandtl-Rohr und Differenzdruckdose und ein LDA-System der Fa. ILA R&D GmbH zur Anwendung.

Unter der Messstrecke des Windkanals ist eine automatische Dreh- und Kippeinrichtung installiert. Diese dient der Kalibrierung von Windrichtungssensoren als auch der Bestimmung der Eigenschaften von Windsensoren bei Schräganströmung. Für zusätzliche Messaufgaben ist im Kanal eine 3D-Traversiereinrichtung installiert, mit der jeder Punkt in der Messstrecke angefahren werden kann.

C.10.2. Beschreibung Ammonit-Kalibrierverfahren

Die Kalibrierung des Flügelradanemometers erfolgte mit Prandtl-Rohr und Differenzdruckdose. Die Abbildung 14 zeigt links den gesamten Windkanal und rechts die Kalibrierung des Flügelradanemometers.

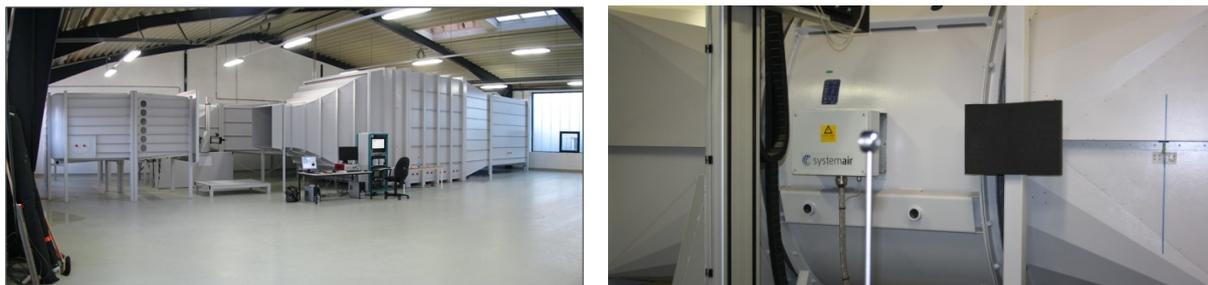


Abbildung 14: Ammonit-Windkanal in Bargeshagen (links); Kalibrierung des Flügelradanemometers in der Messkammer (rechts)

Die Strömungsgeschwindigkeit in der Messstrecke des Windkanals wurde bei der Kalibrierung des Flügelradanemometers mit vier Prandtl-Rohren und Differenzdruckdose vor dem Düsenaustritt gemessen. Die Kalibrierposition des Sensorkopfes im Windkanal war 600 mm vom Düsenaustritt entfernt in der Strahlmitte.

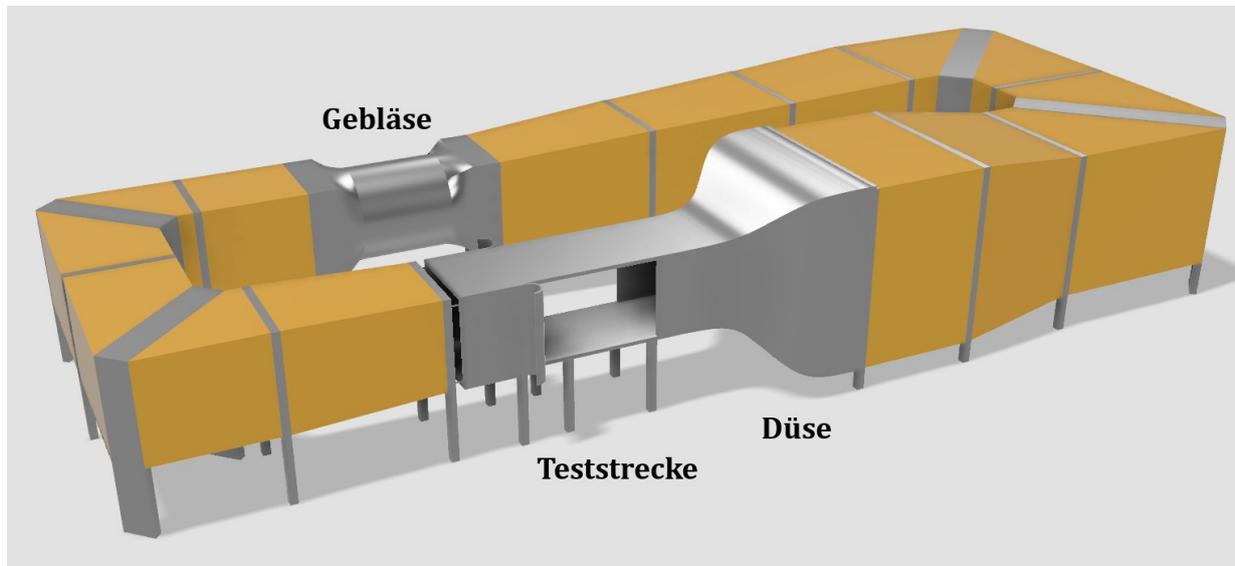
Die Messwerte wurden mittels elektronischer Datenerfassung über eine Messzeit von 30 s aufgenommen. Die Aufbereitung der Messwerte und die Unsicherheitsbetrachtung erfolgte entsprechend MEASNET-Richtlinie [13] und IEC 61400-12-1 Ed. 2 [14].

C.11. Deutsche WindGuard Wind Tunnel Services GmbH: Prüfstand und Kalibrierverfahren

C.11.1. DWG-Windkanal WT2

Der DWG-Windkanal WT2 ist ein geschlossener Niedergeschwindigkeits-Windkanal Göttinger Bauart mit halboffener Messstrecke. Der genutzte Strömungsgeschwindigkeitsbereich für die Anemometerkalibrierung beträgt 0,5 m/s bis 38 m/s.

Durch Untersuchungen zur Strömungsqualität wurde sichergestellt, dass der Prüfling keinen Einfluss auf die Messung der Referenzgeschwindigkeit hat und auch kein entgegengesetzter Einfluss besteht. Untersuchungen zur Teststreckendimensionierung haben gezeigt, dass der Sensor bei einem Abstand von 500 mm zur Teststreckenbegrenzung durch die Eintauchtiefe nicht mehr beeinflusst wird. Außerdem sorgt der halboffene Teststreckenaufbau für einen verschwindend geringen Einfluss durch Verblockung, bei Verblockungsverhältnissen kleiner als 0,15. Die größten Anemometer, welche in den DWG-Windkanälen untersucht werden, haben ein Verblockungsverhältnis von $< 0,05$.



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 15: Messanordnung des DWG-Windkanals WT2

Bei der Messunsicherheitsbetrachtung werden neben den zuvor beschriebenen Einflusskomponenten und den Komponenten, die auf die Rückführung der Windkanalgeschwindigkeit zurückzuführen sind, auch die Umgebungsbedingungen, die Homogenität der Windgeschwindigkeit im Messvolumen, die Stabilität der Strömungsgeschwindigkeit, der Einfluss einer Fehlausrichtung zwischen Prüfling und Strömungsfeld und die Wiederholbarkeit beachtet.

| | | | |
|---|--|------------|---------|
|  | DKD-Ringvergleich für Strömungsgeschwindigkeit https://doi.org/10.7795/550.20250312 | DKD-V 11-4 | |
| | | Version: | 03/2025 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 39/40 |

Die Ausrichtung des Strömungsfeldes an der Position des Prüflings wird mittels Mehrlochdrucksonde gemessen. Zwei Linienlaser die strömungsparallel ausgerichtet werden, dienen zur Visualisierung der Strömungsorientierung.

C.11.2. Beschreibung DWG-Kalibrierverfahren

Der Prüfling wird 780 mm hinter der Düsenaustrittsfläche in der Mitte des Windkanals positioniert. Somit beträgt der Abstand zur Teststreckenbegrenzung 500 mm. Der Sensor wird mit Hilfe von Linienlasern strömungsparallel ausgerichtet.

Die Kalibrierung erfolgt für vorgegebene Messdauer und Strömungsgeschwindigkeitswerte durch die gleichzeitige Erfassung der Referenz- und Prüflinggeschwindigkeiten. Für diesen Ringvergleich wurde pro Messpunkt der Analogausgang mittels elektronischer Datenerfassung für 60 s aufgezeichnet und parallel die Displayausgabe alle 10 s manuell erfasst. Die Auswertung der Displayausgabe wurde für den Ringvergleich herangezogen.

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



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de