

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



DKD

Vergleichsbericht DKD-V 11-3

Ringvergleich Flüssigkeiten

Durchflussbereiche: 0,08 m³/h ... 1,20 m³/h
0,90 m³/h ... 9,00 m³/h
60,00 m³/h ... 600,00 m³/h

Juni 2017 bis Dezember 2020

Ausgabe 04/2022

<https://doi.org/10.7795/550.20220609>



	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	2 / 93

Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

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

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

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

Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

DKD-Geschäftsstelle

Bundesallee 100 38116 Braunschweig

Postfach 33 45 38023 Braunschweig

Telefon Sekretariat: 0531 592-8021

Internet: www.dkd.eu

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	3 / 93

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Vergleichsbericht DKD-V 11-3 Ringvergleich Flüssigkeiten – Juni 2017 bis Dezember 2020, Ausgabe 04/2022, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20220609

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



Autor:

Dr. Enrico Frahm, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 1.5, Braunschweig

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

	<p>Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609</p>	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	4 / 93

Vorwort

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

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

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

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	5 / 93

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Organisation.....	8
2.1	Teilnehmer und Zeitplan.....	8
3	Transfergeräte.....	10
4	Messprogramm	13
4.1	Kalibrierprogramm für die teilnehmenden Laboratorien	13
4.2	Kalibriermethoden und Prüfstandsunsicherheiten	15
4.3	Charakterisierungsmessungen im Pilotlabor	15
5	Berechnungsgrundlagen und Evaluierungskriterien.....	18
5.1	Geräte- <i>K</i> -Faktor und Temperaturkorrektur der Messabweichung x_i	18
5.2	Unsicherheit der Messergebnisse u_{x_i} und Temperaturkorrektur von x_i	19
5.3	Referenzwerte y und Unsicherheiten $u(y)$	19
5.4	Differenzen d_i und E_N -Wert-Berechnung	20
5.5	Verhältnisswert u_{Vergl} ZU u_{Labor}	21
5.6	Evaluierungskriterien.....	21
6	Laborbedingungen, Geräteeigenschaften und -unsicherheiten.....	22
6.1	Drift der Transfergeräte - Unsicherheit u_{Drift}	24
6.2	Bestimmung der Reproducibility-Eigenschaften - Unsicherheit u_{Reprod}	26
6.3	Temperaturabhängigkeit - Unsicherheit u_{Temp}	29
6.3.1	Gerät #1_Turbine DN15	29
6.3.2	Gerät #2_MID DN25	30
6.3.3	Gerät #3_Coriolis DN25	32
6.3.4	Gerät #4_Turbine DN150	35
6.4	Druckabhängigkeit - Unsicherheit u_{Druck}	38
6.4.1	Gerät #1_Turbine DN15	38
6.4.2	Gerät #2_MID DN25	39
6.4.3	Gerät #3_Coriolis DN25	40
6.4.4	Gerät #4_Turbine DN150	42
6.5	Durchflussstabilität - Unsicherheit u_{Stab}	43
6.5.1	Gerät #1_Turbine DN15	43
6.5.2	Gerät #2_MID DN25	44
6.5.3	Gerät #3_Coriolis DN25	46
6.5.4	Gerät #4_Turbine DN150	47
6.6	Einfluss der Einlaufbedingungen - Unsicherheit u_{Einlauf}	48
6.6.1	Gerät #1_Turbine DN15	48

6.6.2	Gerät #2_MID DN25	49
6.6.3	Gerät #3_Coriolis DN25	50
6.6.4	Gerät #4_Turbine DN150	51
7	Ergebnisse	53
7.1	Laborbedingungen	53
7.2	Kalibrierergebnisse - Gerät #1_Turbine DN15.....	56
7.2.1	Zusammenfassung.....	56
7.2.2	Einzelergebnisse der Laboratorien	60
7.3	Kalibrierergebnisse - Gerät #2_MID DN25	64
7.3.1	Zusammenfassung.....	64
7.3.2	Einzelergebnisse der Laboratorien	67
7.4	Kalibrierergebnisse - Gerät #3_Coriolis DN25.....	73
7.4.1	Zusammenfassung.....	73
7.4.2	Einzelergebnisse der Laboratorien	77
7.5	Kalibrierergebnisse - Gerät #4_Turbine DN150.....	87
7.5.1	Zusammenfassung.....	87
7.5.2	Einzelergebnisse der Laboratorien	88
8	Formelzeichen und Abkürzungen	90
9	Literaturverzeichnis	92

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	7 / 93

1 Einleitung

Das Ziel dieses Ringvergleiches „Flüssigkeiten“ war die Bestätigung der akkreditierten Messunsicherheiten der teilnehmenden Laboratorien und Prüfstände.

Die Bestätigung erfolgte über den Vergleichsreferenzwert y (engl.: *reference value*) und den Grad der Übereinstimmung E_N (engl.: *degree of equivalence*) der Laboratorien im Vergleich zu diesem Referenzwert. Die PTB stellte als nationales Metrologieinstitut bei drei verwendeten Transfergeräten das Referenzlabor und durch die eigenen Messungen den Referenzwert. Bei einem vierten Transfergerät wurde der Referenzwert aus den Messwerten der beteiligten Laboratorien gebildet.

Die Messungen und Auswertungen erfolgten auf Grundlage des Technisches Protokoll zum DKD-Ringvergleich „Flüssigkeiten“ mit dem Stand 08/2018 [1].

Im vorliegenden Ringvergleich waren für die Auswahl der Durchflussbereiche die technischen Möglichkeiten und die Messbereiche der teilnehmenden Laboratorien sowie die Verfügbarkeit von geeigneten Transfergeräten maßgeblich.

Für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse spielte der Geräte- K -Faktor eine zentrale Rolle. Dieser wurde als Ausgangsgröße für die Auswertungen der Kalibrierergebnisse verwendet, wobei sich, je nach eingesetztem Transfergerät und Kalibrierverfahren, folgende zwei Vergleichswerte ergaben:

- a) der mit dem Transfergerät ermittelte Geräte- K -Faktor in Bezug auf Masse

$$K_m \quad [\text{Impulse/Masse}]$$

- b) der mit dem Transfergerät ermittelte Geräte- K -Faktor in Bezug auf Volumen

$$K_v \quad [\text{Impulse/Volumen}].$$

Das Transfersetup bestand aus vier einzelnen Durchflussmessgeräten (Tabelle 3 bis Tabelle 6), die je nach technischer Messmöglichkeit von den teilnehmenden Laboratorien kalibriert wurden.

Als Bezugsgrößen für die Bestimmung der Referenzwerte wurden die jeweiligen Primärsignale der Transfergeräte verwendet: Volumen bei den eingesetzten Turbinen bzw. dem magnetisch-induktivem Durchflussmessgerät (MID) sowie Masse beim Coriolis-Messgerät.

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	8 / 93

2 Organisation

Der nationale Ringvergleich „Flüssigkeiten“ wurde auf der 10. Sitzung des DKD-Fachausschusses „Strömungsmessgrößen“ am 18.05.2017 beschlossen. Verantwortlich für Organisation und Auswertung des Vergleiches war die Arbeitsgruppe 1.52 „Darstellung Flüssigkeitsmenge“ der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig.

Die vorläufigen Ergebnisse wurden auf der 15. Sitzung des DKD-Fachausschusses „Strömungsmessgrößen“ am 24.09.2020 vorgestellt.

Die nachfolgende Präsentation der Ergebnisse erfolgt anonymisiert. Die Nummerierung der teilnehmenden Laboratorien wurde zufällig zugeordnet und unterliegt keiner Wertung bzw. spezieller Reihenfolge.

2.1 Teilnehmer und Zeitplan

Teilnehmerliste und Zeitplan des Ringvergleiches sind in Tabelle 1 bzw. Tabelle 2 aufgelistet. Der Ablauf erfolgte als doppelter Loop, wobei die erste, mittlere und letzte Messung im Pilotlabor durchgeführt wurde (Geräte #2 bis #4). Mit Gerät #1_Turbine DN15 wurden keine Messungen im Pilotlabor durchgeführt. Die Start- und Abschlussmessungen erfolgten stattdessen im Labor 4.

Tabelle 1: Teilnehmerliste - Angabe der akkreditierten Labore in alphabetischer Reihenfolge

Teilnehmer	Angaben zum Bezug der Prüfstandsunsicherheit
PTB - Pilotlabor	Für den Prüfstand „Hydrodynamisches Prüffeld“ des Fachbereiches 1.5 sind die folgenden CMC-Einträge in der CIPM MRA Database gelistet (Kalibrierung von Durchflusssensoren): Messgrößen Masse und Volumen für den Bereich 30 kg bis 30 000 kg bzw. 30 L bis 30 000 L sowie die Messgrößen Masse- und Volumendurchfluss im Bereich 0,3 t/h bis 2 100 t/h bzw. 0,3 m ³ /h bis 2 100 m ³ /h
ABB Automation Products GmbH	Im Rahmen der Vergleichsmessungen war die Firma ABB mit den beteiligten Prüfständen in Göttingen für die Kalibrierung von Durchflusssensoren für die Messgrößen Masse- und Volumendurchfluss im Bereich 0,2 t/h bis 3 000 t/h bzw. 0,2 m ³ /h bis 3 000 m ³ /h akkreditiert.
Endress+Hauser (Deutschland) GmbH & Co. KG	Im Rahmen der Vergleichsmessungen war die Firma Endress+Hauser mit den beteiligten Prüfständen in Weil am Rhein für die Kalibrierung von Durchflusssensoren für die Messgrößen Masse- und Volumendurchfluss im Bereich 0,036 t/h bis 100 t/h bzw. 0,036 m ³ /h bis 100 m ³ /h akkreditiert.
KEM Küppers Elektromechanik GmbH	Im Rahmen der Vergleichsmessungen war die Firma KEM Küppers mit den beteiligten Prüfständen in Bad Kötzing für die Kalibrierung von Durchflusssensoren für die Messgrößen Masse- und Volumendurchfluss im Bereich 0,015 kg/min bis 1 500 kg/min bzw. 0,016 L/min bis 2 000 L/min akkreditiert.
NATEC Sensors GmbH	Im Rahmen der Vergleichsmessungen war die Firma NATEC mit den beteiligten Prüfständen in Garching für die Kalibrierung von Durchflusssensoren für die Messgrößen Volumendurchfluss im Bereich 0,0038 L/min bis 189,3 L/min akkreditiert.
ROTA YOKOGAWA GmbH & Co. KG	Im Rahmen der Vergleichsmessungen war die Firma Rota Yokogawa mit den beteiligten Prüfständen in Wehr am Rhein für die Kalibrierung von Durchflusssensoren für die Messgrößen Masse und Volumen von strömenden Flüssigkeiten im Bereich 0,02 kg bis 15 000 kg bzw. 0,02 L bis 15 000 L und für die Messgrößen Masse- und Volumendurchfluss im Bereich 2 kg/h bis 1 200 t/h bzw. 2 L/h bis 900 m ³ /h akkreditiert.

Tabelle 2: Anonymisierte Teilnehmerliste und Kalibrierzeiträume – angegeben sind die Zeitpunkte der Standardmessungen zur Auf- und Abwärtskalibrierung (Tabelle 7 bis Tabelle 10). Zusätzliche Kalibrierungen zur Charakterisierung der Transfergeräte sind in Tabelle 12 bis Tabelle 14 zusammengestellt.

Teilnehmer	Kalibrierzeitraum
PTB - Pilotlabor (Messung PTB_1)	06.06. - 09.06.2017
Labor 4	30.11.2017 21.12.2020
Labor 2	31.01. - 06.02.2018
PTB - Pilotlabor (Messung PTB_2)	20.02. - 23.02.2018
Labor 1	04.04. - 07.04.2018
Labor 5	03.05. - 09.05.2018
Labor 3	12.07. - 17.07.2018
PTB - Pilotlabor (Messung PTB_3)	10.07. - 24.07.2018

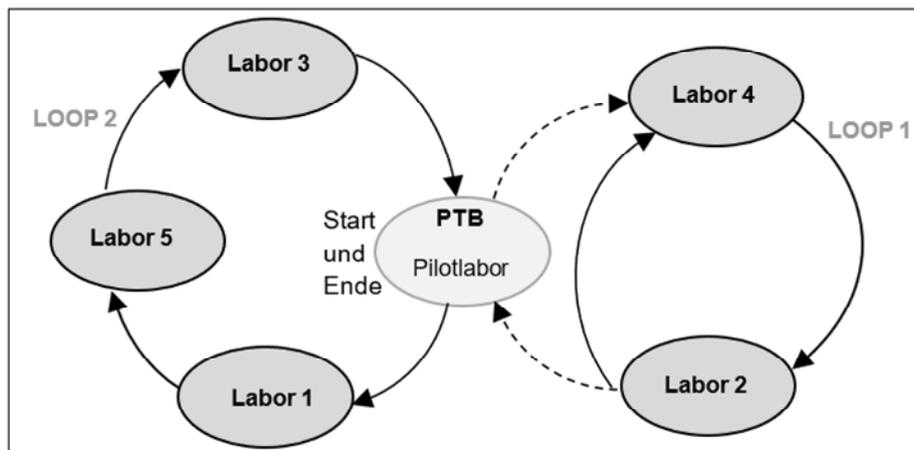


Abbildung 1: Ablaufschema des Ringvergleiches

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	10 / 93

3 Transfergeräte

Gerät #1 – Turbine DN15

Tabelle 3: Transfergerät #1 - Turbine DN15

Hersteller:	NATEC Sensors GmbH	Deutschland
Typ:	Turbine NT6-8	
S/N:	86017000006	
Einbaulänge:	395 mm	
Messaufnehmer:	Serial No.: 140930	Spannungsversorgung: Gleichspannung: 10 V bis 30 V
Signal Ausgang:	Impuls, Rechtecksignal	0 kHz ... 2 kHz, 0 l/min ... 20 l/min
	nominaler <i>K</i> -Faktor: $K_{V,nom}$	6 000,00 Impulse/L
Anschlusskabel	Signal Ausgang: BNC-Buchse	
Prozessanschluss	Flansch, DIN, DN15, PN40	

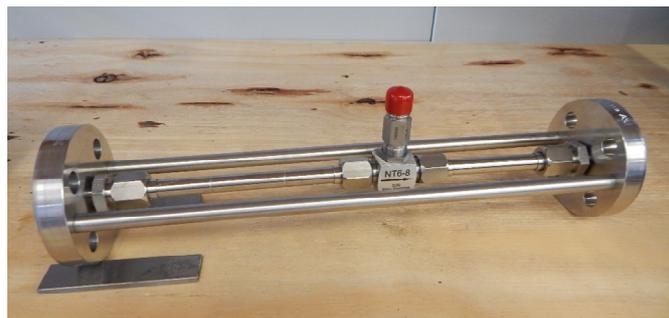


Abbildung 2: Transfergerät #1 - Turbine DN15

Gerät #2 – MID DN25, KROHNE:

Tabelle 4: Transfergerät #2 - MID DN25

Hersteller:	KROHNE Messtechnik/Altometer	Niederlande
Typ:	MID (Magnetisch-Induktiv) OPTIFLUX 5300	
S/N:	A13023446	
Einbaulänge:	430 mm	
Messaufnehmer:	Typ: IFC 300 Serial No.: 11021408	Spannungsversorgung: 230 V / 50 Hz
Signal Ausgang:	Impuls, Rechtecksignal	0 kHz ... 2,5 kHz, 0 m ³ /h ... 9 m ³ /h
	nominaler <i>K</i> -Faktor: $K_{V,nom}$	1 000,00 Impulse/L
Anschlusskabel	Signal Ausgang: Bananenstecker rot/schwarz	Spannungsversorgung: Netzstecker
Prozessanschluss	Flansch, DIN, DN25, PN40	



Abbildung 3: Transfergerät #2 - MID DN25, KROHNE

Gerät #3 – Coriolis DN25, Endress + Hauser

Tabelle 5: Transfergerät #4 - Coriolis DN25

Hersteller:	Endress + Hauser GmbH	Schweiz
Typ:	Coriolis Promass 83F25-6TH8/0	
S/N:	L40E0B02000	
Einbaulänge:	690 mm	
Messaufnehmer:		Spannungsversorgung: 230 V / 50 Hz
Signalausgang:	Impuls, Rechtecksignal	0 kHz ... 10 kHz, 0 kg/h ... 9 000 kg/h
	nominaler K-Faktor: $K_{m,nom}$	4 000,00 Impulse/kg
Anschlusskabel	Signalausgang: Klemme braun/schwarz	Spannungsversorgung: Netzstecker
Prozessanschluss	Flansch, DIN, DN25, PN16	



Abbildung 4: Transfergerät #4 - Coriolis DN25

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	12 / 93

Gerät #4 – Turbine DN150

Tabelle 6: Transfergerät #4 - Turbine DN150, KEM Küppers

Hersteller:	KEM Küppers	Deutschland
Typ:	Turbine KEM HMF 150F	
S/N:	23285	
Einbaulänge:	577 mm	
Messaufnehmer:	Typ: VTEK/P Serial No.: 13014115	Spannungsversorgung: Gleichspannung: 24 V
Signalausgang:	Rechteck-Ausgangssignal	0 Hz ... 334 Hz, 0 m ³ /h ... 600 m ³ /h
	nominaler K -Faktor: K_{V_nom}	2,00 Impulse/L
Anschlusskabel	Signalausgänge	Spannungsversorgung
Prozessanschluss	Flansch, DIN, DN150, PN16	



Abbildung 5: Transfergerät #4 - Turbine DN150, KEM Küppers

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	13 / 93

4 Messprogramm

4.1 Kalibrierprogramm für die teilnehmenden Laboratorien

Im Rahmen der Vergleichsmessungen sollten die Laboratorien bestmöglich unter den folgend aufgeführten Nominalbedingungen kalibrieren. Die Messungen sollten weiterhin als Standardkalibrierung durchgeführt werden, für die das jeweilige Laboratorium akkreditiert ist.

Referenzbedingungen

Fluidtemperatur: 20 °C

Druck: 3 bar (gemessen als Überdruck nach dem Durchflussmessgerät)

Nominaldurchflüsse: entsprechend Tabelle 7 bis Tabelle 10

Transfergerät: je nach Einsatzmöglichkeit des teilnehmenden Laboratoriums

Tabelle 7: Gerät #1 (Turbine DN15) - Messprogramm für die teilnehmenden Laboratorien

Kalibrier- richtung (Durchfluss)	Vor- bereitungen	Messungen je Durchfluss	Nominaldurchfluss in m³/h	Arbeiten nach der letzten Messung
Abwärts	Einbau des Transfergerätes	5	1,20 1,12 1,04 0,90 0,88 0,80 0,72 0,64 0,56 0,48 0,40 0,32 0,24 0,16 0,08	Transfergerät verbleibt in der Messstrecke
Aufwärts	-	5	0,08 0,16 0,24 0,32 0,40 0,48 0,56 0,64 0,72 0,80 0,88 0,90 1,04 1,12 1,20	Transfergerät wird ausgebaut

Tabelle 8: Gerät #2 (MID DN25) - Messprogramm für die teilnehmenden Laboratorien

Kalibrier- richtung (Durchfluss)	Vor- bereitungen	Messungen je Durchfluss	Nominaldurchfluss in m³/h	Arbeiten nach der letzten Messung
Abwärts	Einbau des Transfergerätes	5	9,0 8,1 7,2 6,3 5,4 4,5 3,6 2,7 1,8 0,9	Transfergerät verbleibt in der Messstrecke
Aufwärts	-	5	0,9 1,8 2,7 3,6 4,5 5,4 6,3 7,2 8,1 9,0	Transfergerät wird ausgebaut

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	14 / 93

Tabelle 9: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Messprogramm für die teilnehmenden Laboratorien

Kalibrier- richtung (Durchfluss)	Vor- bereitungen	Setzen vom Nullpunkt vor der ersten Messung	Messungen je Durchfluss	Nominal- durchfluss in t/h	Arbeiten nach der letzten Messung
Abwärts	Einbau des Transfer- gerätes	ja	5	9,0 8,1 7,2 6,3 5,4 4,5 3,6 2,7 1,8 0,9	Transfergerät verbleibt in der Messstrecke
Aufwärts	-	nein	5	0,9 1,8 2,7 3,6 4,5 5,4 6,3 7,2 8,1 9,0	Transfergerät wird ausgebaut

Tabelle 10: Gerät #4 (Turbine DN150) - Messprogramm für die teilnehmenden Laboratorien

Kalibrier- richtung (Durchfluss)	Vor- bereitungen	Messungen je Durchfluss	Nominaldurchfluss in m³/h	Arbeiten nach der letzten Messung
Abwärts	Einbau des Transfergerätes	5	600,0 450,0 480,0 420,0 360,0 300,0 240,0 180,0 120,0 60,0	Transfergerät verbleibt in der Messstrecke
Aufwärts	-	5	60,0 120,0 180,0 240,0 300,0 360,0 420,0 480,0 540,0 600,0	Transfergerät wird ausgebaut

4.2 Kalibriermethoden und Prüfstandsunsicherheiten

Während der Vergleichsmessungen hatte jedes Laboratorium das für sich zu evaluierende Kalibrierverfahren anzuwenden. Dazu sollte jedes Laboratorium entsprechend den eigenen Möglichkeiten, mindestens eines der vier Transfergeräte kalibrieren. Die jeweils angewandten Kalibrierverfahren, Prüfstände sowie deren nachzuweisenden Unsicherheiten sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Tabelle 11: Teilnehmende Laboratorien, Kalibriermethoden, Prüfliquidität und Prüfstandsunsicherheiten im Messbereich der Vergleichsmessungen

Labor	Kalibriermethode und Referenz	Prüfliquidität	Erweiterte Prüfstandsunsicherheit ($k = 2$)	
			$U(\text{Masse})$ in %	$U(\text{Volumen})$ in %
PTB	statisch-gravimetrisch / Fliegender Start-Stopp	Wasser	0,020	0,020
Labor 1 <i>Prüfstand 1</i>	statisch-gravimetrisch / Stehender Start-Stopp	Wasser	0,025	
Labor 1 <i>Prüfstand 2</i>			0,025	
Labor 1 <i>Prüfstand 3</i>	dynamisch gravimetrisch / Fliegender Start-Stopp	Wasser		0,070
Labor 1 <i>Prüfstand 4</i>	dynamisch gravimetrisch / Fliegender Start-Stopp	Wasser		0,070
Labor 2	dynamisch-gravimetrisch / Fliegender Start-Stopp	Excol D30	0,050	0,100
Labor 3 <i>Prüfstand 1</i>	statisch-gravimetrisch / Fliegender Start-Stopp	Wasser	0,070	
Labor 3 <i>Prüfstand 2</i>				0,100
Labor 4	volumetrisch / Fliegender Start-Stopp	Kalibrieröl		0,100
Labor 5	gravimetrisch / Fliegender Start-Stopp	Wasser	0,050	
	Master-Meter / Fliegender Start-Stopp	Wasser		0,080

4.3 Charakterisierungsmessungen im Pilotlabor

Die Transfergeräte wurden einem umfangreichen Messprogramm zur Charakterisierung der Geräteigenschaften unterzogen (Tabelle 12 bis Tabelle 14). Die Messungen wurden bei definierten Bedingungen durchgeführt, die sich im Wesentlichen auf die in Kapitel 4.1 angegebenen Nominalbedingungen sowie den Standardmessprogrammen der teilnehmenden Laboratorien beziehen. Mit den Charakterisierungsmessungen sollte festgestellt werden, in welchem Umfang die Transfergeräte auf Änderungen der folgenden Parameter reagieren, d. h. inwieweit sich der K -Faktor bzw. die Messabweichung der Geräte verändert: Temperatur der

Kalibrierflüssigkeit, Prozessdruck, Reproducibility (engl. für: erweiterte Vergleichpräzision) und unterschiedliche Einlaufbedingungen. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden für die Berechnung der Unsicherheiten u_{TS} der Transfergeräte verwendet.

Zur Evaluierung der Empfindlichkeit auf Einlaufbedingungen, wurden die Geräte #2 bis #4 mit verschiedenen Vorstörungen und Einlaufängen kalibriert. Um ein möglichst weites Spektrum an realen Einlaufbedingungen nachzubilden, wurden unterschiedlichste Vorstörungen verwendet. Auch diese Messungen wurden im Pilotlabor unter Nominalbedingungen durchgeführt.

Aus technischen Gründen konnten für das Transfergerät #1 - Turbine DN15 keine Charakterisierungsmessungen durchgeführt werden. In diesem Fall beschränken sich die Angaben zur Geräteunsicherheit auf die Größen Drift, Durchflussstabilität und Reproducibility (Tabelle 12).

Tabelle 12: Gerät #1 (Turbine DN15) - Charakterisierungsmessungen in einem teilnehmenden Laboratorium.

Variante	Datum	Fluidtemperatur in °C	Prozessdruck in bar	Messungen je Durchfluss	Nominaldurchfluss in m ³ /h
Reproducibility	21.12.2020	20,6	3	5	1,20 1,12 1,04 0,90 0,88 0,80 0,72 0,64 0,56 0,48 0,40 0,32 0,24 0,16 0,08

Tabelle 13: Gerät #2 (MID DN25) und Gerät #3 (Coriolis DN25) - Charakterisierungsmessungen im Pilotlabor. Angabe der Vorstörungsvarianten mit ungestörter Einlaufänge zum Messgerät

Variante	Datum	Fluidtemperatur in °C	Prozessdruck in bar	Messungen je Durchfluss	Nominaldurchfluss in t/h bzw. m ³ /h
Reproducibility	10.08. bis 22.08.2018	20	3	5	9,0 8,1 7,2 6,3 5,4 4,5 3,6 2,7 1,8 0,9
Druckcharakterisierung	22.08.2018 bis 03.09.2018	20	2, 3, 4	5	9,0 7,2 4,5 2,7 9,0
Temperaturcharakterisierung		20, 24, 28	3		
Drall 0 DN, 20 DN, 40 DN	16.04.2020 bis 18.05.2020	20	3	3	0,9 2,7 4,5 7,2 9,0
Blende unten 0DN					
Blende unten 0 DN, 20 DN, 40 DN, 60 DN					

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	17 / 93

Tabelle 14: Gerät #4 (Turbine DN150) - Charakterisierungsmessungen im Pilotlabor. Angabe der Vorstörungsvarianten mit ungestörter Einlauflänge zum Messgerät

Variante	Datum	Fluid-temperatur in °C	Prozessdruck in bar	Messungen je Durchfluss	Nominal-durchfluss in m³/h
Reproducibility	10.09.2018 bis 27.09.2018	20	3	5	600,0 240,0 180,0 120,0 60,0
Druck- charakterisierung		20	2, 3, 4	5	600,0 240,0 180,0 120,0 60,0
Temperatur- charakterisierung		20, 23, 26	3		
Kombi Drall/Blende 16DN, 43DN	01.10.2018 bis 05.10.2018	20	3	3	600,0 240,0 180,0 120,0 60,0

5 Berechnungsgrundlagen und Evaluierungskriterien

5.1 Geräte-K-Faktor und Temperaturkorrektur der Messabweichung x_i

Als Grundlage für die weiteren Auswertungen wurde aus den zur Verfügung gestellten Kalibrierdaten der Geräte-K-Faktor bestimmt. Je nach Gerätetyp und -messprinzip erfolgte die Berechnung basierend auf den grundsätzlichen Zusammenhängen für Massedurchfluss nach Gleichung (1) bzw. für den Volumendurchfluss nach Gleichung (2) [2]. Die Werte von K_m bzw. K_V wurden einem nominalen K-Faktor gegenübergestellt und so eine relative Messabweichung e berechnet (Gleichungen 3 und 4).

$$K_m = \frac{N_{Impulse}}{m_{Ref}} = \frac{f_{Ausgang}}{\dot{m}_{Ref}} = \frac{N_{Impulse}/t_{Mess}}{m_{Ref}/t_{Mess}} \quad (1)$$

$$K_V = \frac{N_{Impulse}}{V_{Ref}} = \frac{f_{Ausgang}}{\dot{V}_{Ref}} = \frac{N_{Impulse}/t_{Mess}}{V_{Ref}/t_{Mess}} \quad (2)$$

mit	K_m	- Geräte-K-Faktor für den Masseausgang des Transfergerätes (Impulse/kg)
	K_V	- Geräte-K-Faktor für den Volumenausgang des Transfergerätes (Impulse/L)
	m_{Ref}	- Referenzmasse (kg)
	\dot{m}_{Ref}	- Referenzmassedurchfluss (t/h)
	V_{Ref}	- Referenzvolumen (m ³)
	\dot{V}_{Ref}	- Referenzvolumendurchfluss (m ³ /h)
	$N_{Impulse}$	- Anzahl der mit dem Transfergerät gezählten Impulse (Impulse)
	$f_{Ausgang}$	- Ausgangssignal Frequenz des Transfergerätes (Hz)
	t_{Mess}	- Messzeit (s)

$$e_V = \frac{K_V - K_{V,nom}}{K_{V,nom}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

$$e_m = \frac{K_m - K_{m,nom}}{K_{m,nom}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

mit	e_V	- Relative Messabweichung für Volumen (%)
	e_m	- Relative Messabweichung für Masse (%)
	$K_{V,nom}$	- Nominaler K-Faktor des Volumendurchflussmessgerätes (Impulse/L)
	$K_{m,nom}$	- Nominaler K-Faktor des Massedurchflussmessgerätes (Impulse/kg)

Die Ergebnisse der Charakterisierungsmessungen für die Geräte #3 und #4 waren geprägt durch eine systematische Abhängigkeit von der Fluidtemperatur (Kapitel 6.3). Daraufhin wurden alle von den teilnehmenden Laboratorien berichteten Kalibrierdatendaten, d. h. die berechneten Messabweichungen e_V bzw. e_m , durch die Anwendung der Gleichungen (17) bis (21) und von Tabelle 31 bis Tabelle 34 temperaturabhängig zu e_{kor} korrigiert, jeweils getrennt für Masse und Volumen. Für Gerät #2 wurde keine entsprechende Korrektur durchgeführt, da eine systematische Abhängigkeit innerhalb der hier durchgeführten Charakterisierungsmessungen nicht festgestellt werden konnte.

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	19 / 93

Die abschließende Auswertung mittels E_N -Wert-Berechnung erfolgt getrennt für jeden Durchflussspunkt auf der Grundlage von Mittelwerten x_i der Messabweichungen (Gleichung 5). Für diese Mittelwertbildung wurden je Durchflussspunkt die Werte der Auf- und Abwärtskalibrierung zusammenfassend ausgewertet.

$$x_i = \frac{\sum_{k=1}^n (e_{\text{korr},k})}{n} \quad (5)$$

- mit
- x_i - Mittelwert der Messabweichung zur E_N -Wertberechnung in (%)
 - e_{korr} - Temperaturkorrigierte Messabweichung (%)
 - n - Anzahl der Kalibrierungen je Durchflussspunkt
 - i - Laborindex

5.2 Unsicherheit der Messergebnisse u_{x_i} und Temperaturkorrektur von x_i

Nach [3], [4] und [5] beinhaltet die Unsicherheit der berichteten Laborergebnisse x_i die folgenden Teilbeträge: Unsicherheitsbeitrag $u_{\text{Labor},i}$ der Kalibrieranlage, Unsicherheitsbeitrag u_{TS} des Transfergerätes und die Wiederholpräzision der Einzelmessungen (engl.: *Repeatability*). Die für u_{Labor} verwendeten Werte sind in Tabelle 11 aufgelistet. Die Unsicherheit u_{TS} wurde nach Gleichung (14) berechnet. Die entsprechenden Daten sind in Tabelle 16 bis Tabelle 18 zusammengestellt. Der Term $\frac{s}{\sqrt{n}}$ (Gleichung 6) steht für die Wiederholpräzision der Messung in den teilnehmenden Laboratorien [4], wobei auch hier je Durchflussspunkt die Werte der Auf- und Abwärtskalibrierung zusammenfassend ausgewertet worden sind.

$$u_{x,i} = \sqrt{u_{\text{Labor},i}^2 + u_{\text{Vergl}}^2} = \sqrt{u_{\text{Labor},i}^2 + u_{\text{TS}}^2 + \frac{s_i^2}{n_i}} \quad (6)$$

- mit
- $u_{x,i}$ - Standardunsicherheit der Messabweichungen x_i (%)
 - $u_{\text{Labor},i}$ - Standardunsicherheit des Kalibrierstandes i (%)
 - u_{Vergl} - Standardunsicherheiten der Messungen mit dem Transfergerät im Labor i (%)
 - s_i - Standardabweichungen der Einzelmessungen je Durchflussspunkt (%)
 - n_i - Anzahl der Messungen je Durchflussspunkt (%)

5.3 Referenzwerte y und Unsicherheiten $u(y)$

Gemeinsamer Vergleichs-Referenzwert y_1

Für das Transfergerät #1_Turbine DN15 wurde der Referenzwert y_1 als gewichtetes Mittel aus den Kalibrierergebnissen der beteiligten Laboratorien 2 und 4 nach Gleichung (7) bestimmt. Die Berechnung der Unsicherheiten des Referenzwertes erfolgte nach Gleichung (8) und Gleichung (9).

Da in diesem Fall keine Daten eines höher geordneten Referenzlaboratoriums zur Verfügung standen, wurden die beteiligten Laboratorien gleichwertig behandelt und ein gemeinsamer Vergleichs-Referenzwert y_1 berechnet.

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	20 / 93

$$y_1 = \frac{\left(\frac{x_1}{u_{x,1}^2} + \frac{x_2}{u_{x,2}^2} + \dots + \frac{x_i}{u_{x,i}^2} \right)}{\left(\frac{1}{u_{x,1}^2} + \frac{1}{u_{x,2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{x,i}^2} \right)} \quad (7)$$

mit y_1 - Referenzwert y_1 - als gewichtetes Mittel aus den Laborergebnissen (%)

$$\frac{1}{u_{y_1}^2} = \frac{1}{u_{x,1}^2} + \frac{1}{u_{x,2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{x,i}^2} \quad (8)$$

mit u_{y_1} - Standardunsicherheit des Referenzwertes y_1 (%)

$$U(y_1) = 2 \cdot u_{y_1} \quad (9)$$

mit $U(y_1)$ - Erweiterte Unsicherheit des Referenzwertes y_1 mit $k = 2$ (%)

Die PTB als Referenzlabor - Referenzwert y_2

Für die Transfergeräte #2 bis #4 trat die PTB als Referenzlabor auf. Der für diese Messungen gültige Referenzwert y_2 wurde durch Kalibrierungen auf dem Prüfstand „Hydrodynamisches Prüffeld - HDP“ der PTB bestimmt und nach Gleichung (5) berechnet. Diese Methode wird auch als „Lab-to-Lab“-Ansatz bezeichnet. Der Ansatz wird verwendet, wenn sich ein Kalibrierlabor, in diesem Fall ein Teilnehmer aus dem Ringvergleich, mit einem höher geordneten Referenzlabor, in diesem Fall der PTB, vergleicht. Es ist davon auszugehen, dass alle beteiligten Laboratorien über unabhängige Rückführungsketten verfügen und somit keine Kovarianzen zu den Messungen der PTB bestehen. Insofern können die Ergebnisse als unabhängig betrachtet werden.

Von den drei an der PTB durchgeführten Kalibrierperioden (Tabelle 2), wurde die zeitlich in der Mitte liegende Messung PTB_2 als Referenzdatensatz ausgewählt.

Die Unsicherheit u_{y_2} des Referenzwertes wurde nach Gleichung (6) ermittelt. Die Berechnung der erweiterten Unsicherheit $U(y_2)$ erfolgte analog zu Gleichung (9).

5.4 Differenzen d_i und E_N -Wert-Berechnung

Die Differenz d_i zwischen dem Ergebnis eines teilnehmenden Laboratoriums und dem Referenzwert y wird auch als Grad der Übereinstimmung (engl.: *Degree of Equivalence*) bezeichnet und ergibt zusammen mit der Unsicherheit $U(d_i)$ den E_N -Wert (Gleichung 11).

$$d_i = x_i - y \quad (10)$$

mit d_i - Abweichung der Ergebnisse x_i vom Labor i zum Referenzwert y (%)
 y - Referenzwert y_1 bzw. y_2 (%)

$$E_{N,i} = \left| \frac{d_i}{U(d_i)} \right| \quad (11)$$

mit $E_{N,i}$ - Normalisierter Grad der Übereinstimmung
 $U(d_i)$ - Erweiterte Unsicherheit ($k = 2$) von d_i (%)

Die Berechnung der erweiterten Unsicherheit $U(d_i)$ (mit $k = 2$) für den Ansatz des gemeinsamen Vergleichs-Referenzwertes y_1 erfolgte nach Gleichung (12).

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	21 / 93

$$U(d_i) = 2 \cdot \sqrt{u_{x,i}^2 - u_{y1}^2} \quad (12)$$

mit u_{y1} - Standardunsicherheit des Referenzwertes y_1 (%)

Die Berechnung der erweiterten Unsicherheit $U(d_i)$ (mit $k = 2$) für y_2 mit der PTB als Referenzlabor, erfolgte nach Gleichung (13).

$$U(d_i) = 2 \cdot \sqrt{u_{x,i}^2 + u_{y2}^2} \quad (13)$$

mit

u_{y2} - Standardunsicherheit der Messabweichungen x_i im Pilotlabor (%)

5.5 Verhältniswert u_{Vergl} zu u_{Labor}

Ein wichtiges Kriterium für die Güte des Vergleiches stellt die Tauglichkeit des Transfergerätes zum Nachweis der angestrebten Messunsicherheiten dar. Bei [3] bzw. [4] wird in diesem Zusammenhang auf das Verhältnis zwischen der Unsicherheit des Transfergerätes u_{TS} auf der einen und der Prüfstandsunsicherheit u_{Labor} auf der anderen Seite verwiesen. Zusätzlich spielt die Stabilität der Messergebnisse eine maßgebliche Rolle, die nach Gleichung 6 durch die Standardabweichung wiedergegeben wird. Ergibt sich für das Verhältnis von $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$ ein Wert $\leq 2,0$, dann ist von einer Tauglichkeit des Transfergerätes für den Messvergleich auszugehen, die Messungen sind ausreichend stabil und wiederholbar. Andernfalls wäre die Unsicherheit des Gerätes zu hoch und könnte nicht für den Nachweis der angestrebten Prüfstandsunsicherheit verwendet werden.

5.6 Evaluierungskriterien

Für eine abschließende Bewertung der Ergebnisse wurden für den Ringvergleich folgende Kriterien zu Grunde gelegt - nach [3], [4] and [5]:

- Der Teilnehmer i **besteht** den Vergleich, wenn $|E_{N,i}| \leq 1,00$ und $u_{\text{Vergl},i}/u_{\text{Labor},i} \leq 2,00$.
Die angegebene Prüfstandsunsicherheit vom Laboratorium i kann mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % der Unsicherheitsangabe gegenüber dem Referenzwert bestätigt werden ($k = 2$).
- Der Teilnehmer i besteht den Vergleich in einem kritischen **Warnbereich**, wenn $1,00 < |E_{N,i}| \leq 1,20$ und $u_{\text{Vergl},i}/u_{\text{Labor},i} \leq 2,00$.
- Die Ergebnisse für den Teilnehmer i **sind un schlüssig**, wenn $|E_{N,i}| \leq 1,20$ und $u_{\text{Vergl},i}/u_{\text{Labor},i} > 2,00$. Die angestrebte Unsicherheit des Kalibrierlabors kann mit den vorliegenden Messungen nicht betätigt werden.
In diesem Fall sind die Unsicherheiten des verwendeten Transfergerätes und/oder die Streuung der Messwerte zu hoch, um die angestrebte Prüfstandsunsicherheit bestätigen zu können.
- Der Teilnehmer i besteht den **Vergleich nicht**, wenn $|E_{N,i}| > 1,20$.
Die Ergebnisse liegen außerhalb der nachzuweisenden Prüfstandsunsicherheiten. Diese können nicht bestätigt werden.

6.1 Drift der Transfergeräte - Unsicherheit u_{Drift}

Die Standardunsicherheit u_{Drift} der Transfergeräte in Bezug auf deren Langzeitstabilität (= Drift) wurde auf der Basis wiederholter Kalibrierungen bestimmt. Für jede Kalibrierperiode wurde jeweils ein Mittelwert der Messabweichung x_i berechnet (Abbildung 6 bis Abbildung 9). Die abschließenden Werte für u_{Drift} (Tabelle 19 bis Tabelle 22) wurden separat für jeden Durchfluss nach Gleichung (15) bestimmt.

$$u_{\text{Drift}} = \frac{\text{Max}(x_i) - \text{Min}(x_i)}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (15)$$

mit u_{Drift} - Standardunsicherheit infolge der Langzeitstabilität des Transfergerätes (%)

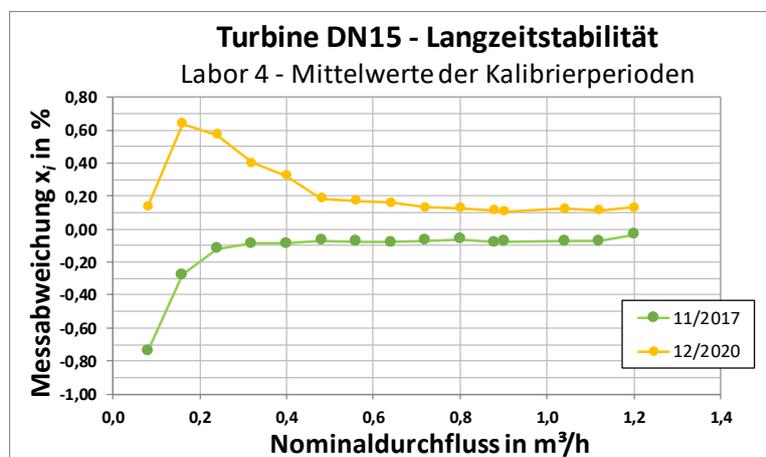


Abbildung 6: Langzeitstabilität Gerät #1 (Turbine DN15) - Mittelwerte Messabweichung x_i für die einzelnen Messperioden im Labor 4

Tabelle 19: Standardunsicherheiten u_{Drift} zur Langzeitstabilität von Gerät #1 (Turbine DN15)

	Nominaldurchfluss in m³/h									
	1,20	1,12	1,04	0,90	0,88	0,80	0,72	0,64	0,56	0,48
u_{Drift} in %	0,048	0,054	0,057	0,053	0,055	0,055	0,058	0,070	0,072	0,073
	Nominaldurchfluss in m³/h									
	0,40	0,32	0,24	0,16	0,08					
u_{Drift} in %	0,119	0,142	0,200	0,265	0,253					

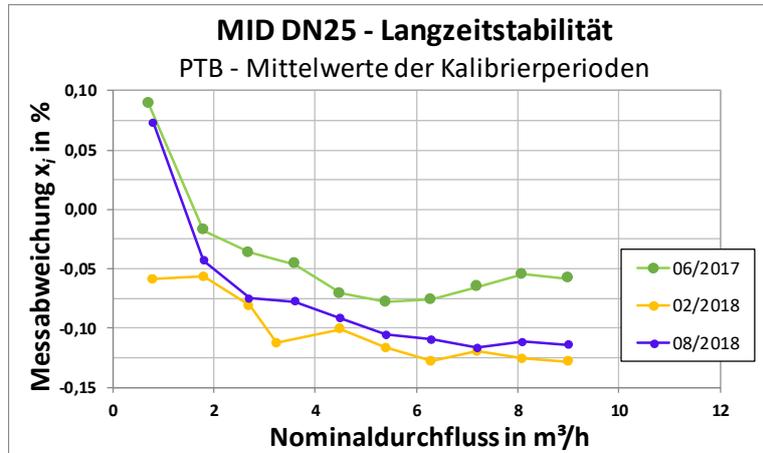


Abbildung 7: Langzeitstabilität Gerät #2 (MID DN25) - Mittelwerte Messabweichung x_i für die einzelnen Messperioden im Pilotlabor

Tabelle 20: Standardunsicherheiten u_{Drift} zur Langzeitstabilität von Gerät #2 (MID DN25)

	Nominaldurchfluss in m³/h									
	9,0	8,1	7,2	6,3	5,4	4,5	3,6	2,7	1,8	0,9
u_{Drift} in %	0,020	0,021	0,016	0,015	0,011	0,009	0,019	0,013	0,011	0,043

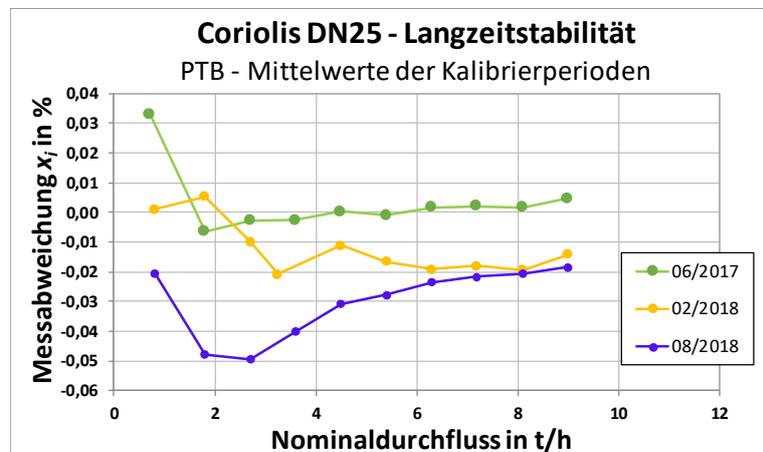


Abbildung 8: Langzeitstabilität Gerät #3 (Coriolis DN25) - Mittelwerte Messabweichung x_i für die einzelnen Messperioden im Pilotlabor

Tabelle 21: Standardunsicherheiten u_{Drift} zur Langzeitstabilität von Gerät #3 (Coriolis DN25)

	Nominaldurchfluss in t/h									
	9,0	8,1	7,2	6,3	5,4	4,5	3,6	2,7	1,8	0,9
u_{Drift} in %	0,007	0,006	0,007	0,007	0,008	0,009	0,011	0,014	0,016	0,016

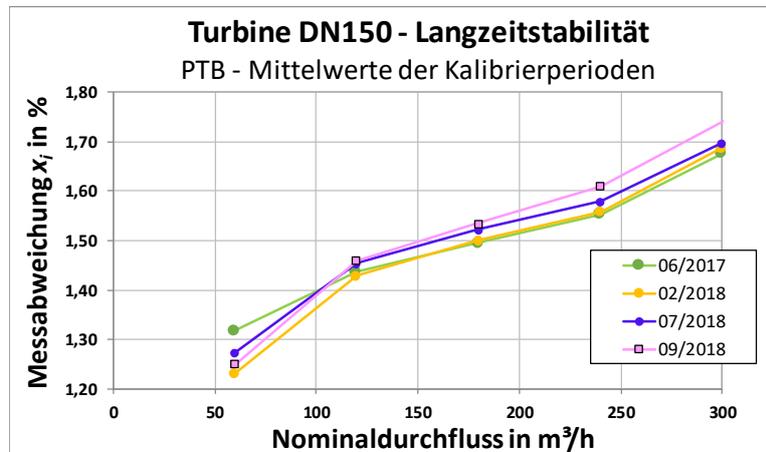


Abbildung 9: Langzeitstabilität Gerät #4 (Turbine DN150) - Mittelwerte Messabweichung x_i für die einzelnen Messperioden im Pilotlabor

Tabelle 22: Standardunsicherheiten u_{Drift} zur Langzeitstabilität von Gerät #4 (Turbine DN150)

	Nominaldurchfluss in m³/h									
	600	540	480	420	360	300	240	180	120	60
u_{Drift} in %	0,008	0,002	0,002	0,002	0,004	0,006	0,017	0,011	0,009	0,025

6.2 Bestimmung der Reproducibility-Eigenschaften - Unsicherheit u_{Reprod}

Die Standardunsicherheit u_{Reprod} bezieht sich auf die Reproducibility-Eigenschaften (*deutsch*: erweiterte Vergleichspräzision) der Transfergeräte. Die Berechnung von u_{Reprod} erfolgte basierend auf Messungen im Pilotlabor bzw. Labor 4 (Tabelle 12 bis Tabelle 14) nach Glg.(16). Als Eingangsgrößen wurden für jeden Durchfluss die Messabweichungen x_i für die Auf- und Abwärtsmessung sowie die Daten einer wiederholten Abwärtsmessung nach einem Aus- und Einbau des Gerätes verwendet (Abbildung 10 bis Abbildung 13). Für die Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass die Werte von u_{Reprod} (Tabelle 23 bis

Tabelle 26) die folgenden Beiträge zur Unsicherheit berücksichtigen: Kurzzeitdrift, Einfluss des Nullpunktsetzen (gilt nur für Coriolis-Gerät) und den Ein- und Ausbau des Messgerätes.

$$u_{\text{Reprod}} = \frac{\text{Max}(x_i) - \text{Min}(x_i)}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (16)$$

mit u_{Reprod} - Standardunsicherheit infolge der Reproducibility-Eigenschaften des Gerätes (%)

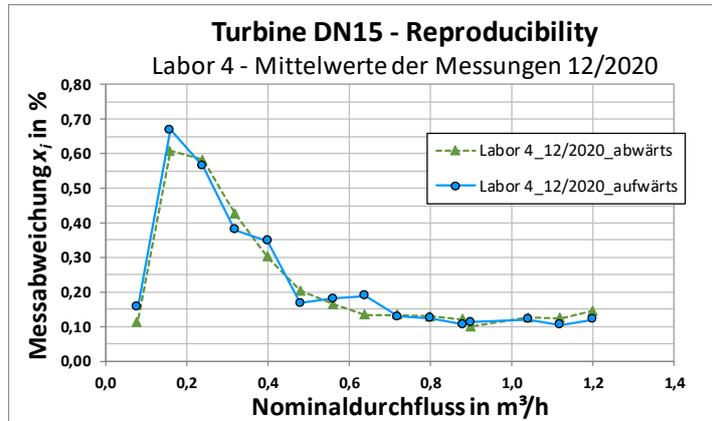


Abbildung 10: Reproducibility-Messungen Gerät #1 (Turbine DN15) - Ergebnisse der Kalibrierungen zur Bestimmung der Unsicherheit u_{Reprod} in Labor 4 (12/2020). Vor der Messung „aufwärts“ wurde das Gerät aus- und wieder eingebaut.

Tabelle 23: Standardunsicherheiten u_{Reprod} zu den Reproducibility-Eigenschaften von Gerät #1 (Turbine DN15)

	Nominaldurchfluss in m³/h									
	1,2	1,12	1,04	0,96	0,88	0,8	0,72	0,64	0,56	0,48
u_{Drift} in %	0,007	0,006	0,001	0,004	0,004	0,001	0,001	0,016	0,005	0,010
	Nominaldurchfluss in m³/h									
	0,4	0,32	0,24	0,16	0,08					
u_{Drift} in %	0,013	0,014	0,005	0,018	0,013					

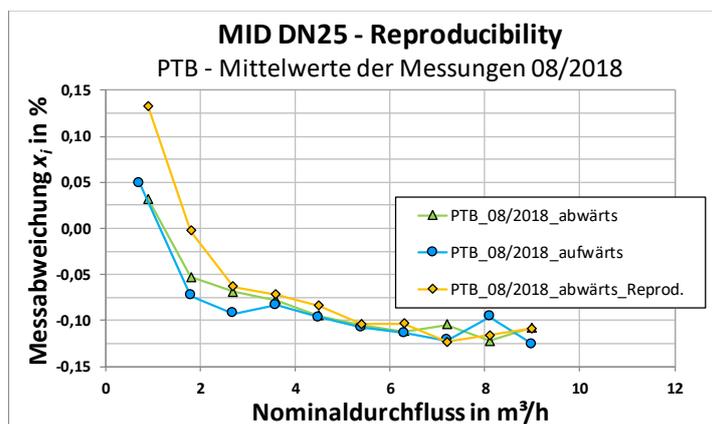


Abbildung 11: Reproducibility-Messungen Gerät #2 (MID DN25) - Ergebnisse der Kalibrierungen zur Bestimmung der Unsicherheit u_{Reprod} im Pilotlabor 08/2018. Vor der Messung „abwärts_Reprod.“ wurde das Gerät aus- und wieder eingebaut.

Tabelle 24: Standardunsicherheiten u_{Reprod} zu den Reproducibility-Eigenschaften von Gerät #2 (MID DN25)

	Nominaldurchfluss in m³/h									
	9,0	8,1	7,2	6,4	5,4	4,5	3,6	2,7	1,8	0,9
u_{Reprod} in %	0,005	0,008	0,005	0,003	0,001	0,004	0,003	0,008	0,020	0,029

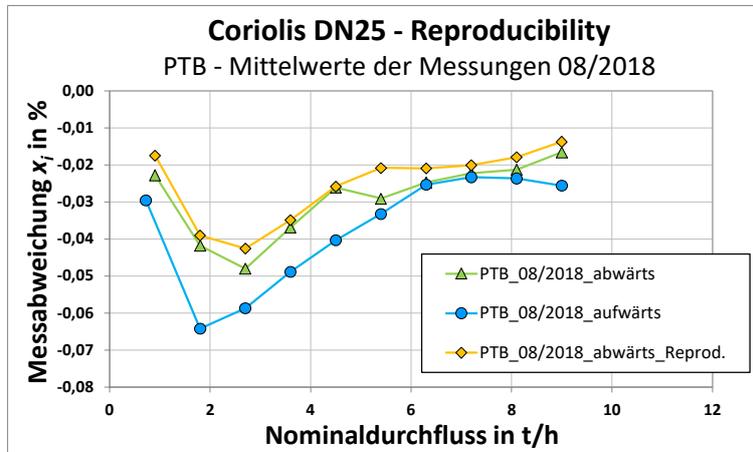


Abbildung 12: Reproducibility-Messungen Gerät #3 (Coriolis DN25) - Ergebnisse der Kalibrierungen zur Bestimmung der Unsicherheit u_{Reprod} im Pilotlabor 08/2018. Vor der Messung „abwärts_Reprod.“ wurde das Gerät aus- und wieder eingebaut.

Tabelle 25: Standardunsicherheiten u_{Reprod} zu den Reproducibility-Eigenschaften von Gerät #3 (Coriolis DN25)

	Nominaldurchfluss in t/h									
	9,0	8,1	7,2	6,4	5,4	4,5	3,6	2,7	1,8	0,9
u_{Reprod} in %	0,003	0,002	0,001	0,001	0,004	0,004	0,004	0,005	0,007	0,003

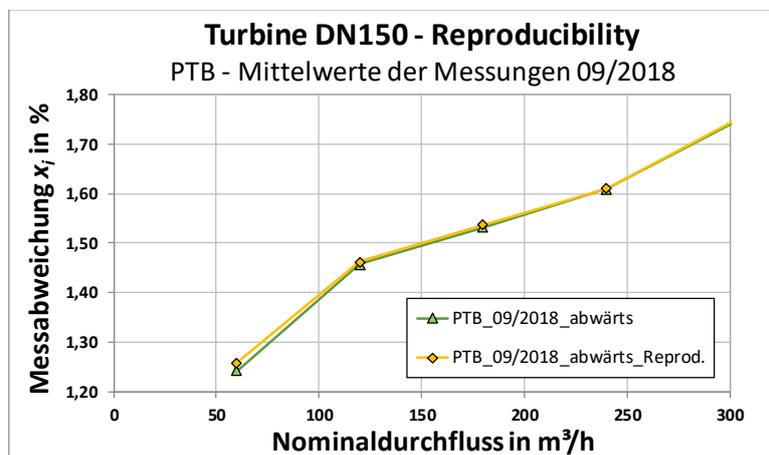


Abbildung 13: Reproducibility-Messungen Gerät #4 (Turbine DN150) - Ergebnisse der Kalibrierungen zur Bestimmung der Unsicherheit u_{Reprod} im Pilotlabor 09/2018. Vor der Messung „abwärts_Reprod.“ wurde das Gerät aus- und wieder eingebaut.

Tabelle 26: Standardunsicherheiten u_{Reprod} zu den Reproducibility-Eigenschaften von Gerät #4 (Turbine DN150) für u_{TS}

	Nominaldurchfluss in m³/h									
	600	540	480	420	360	300	240	180	120	60
u_{Reprod} in %	0,006	keine Messungen					0,000	0,002	0,002	0,004

6.3 Temperaturabhängigkeit - Unsicherheit u_{Temp}

6.3.1 Gerät #1_Turbine DN15

Laborbedingungen

Die Kalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien wurden bei Fluidtemperaturen zwischen 20,10 °C und 27,30 °C durchgeführt. Innerhalb eines Laboratoriums lag die maximale Spannweite, ausgedrückt als $\max(T_{Fluid}) - \min(T_{Fluid})$, bei 1,38 °C (Tabelle 27 und Abbildung 14).

Tabelle 27: Fluidtemperatur T_{Fluid} (°C) in den teilnehmenden Laboratorien - Kalibrierung Gerät #1 (Turbine DN15)

Labor Zeitraum	Labor 4 11/2017	Labor 2 01/2018	Labor 4 12/2020
Max	22,23	27,30	21,32
Min	20,85	26,90	20,10
Max – Min	1,38	0,40	1,22
Mittelwert	21,80	27,15	20,63

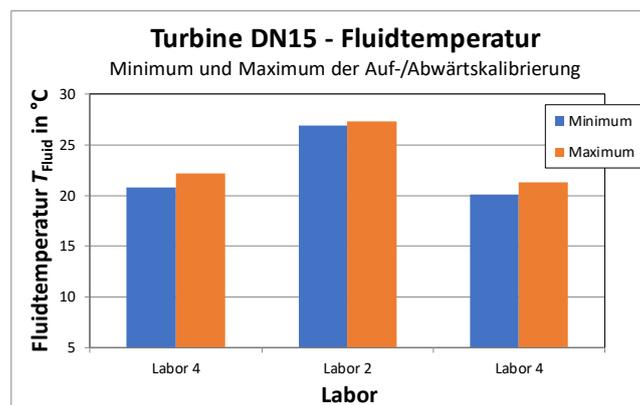


Abbildung 14: Fluidtemperaturen T_{Fluid} während der Kalibrierung von Gerät #1 (Turbine DN15) - Maximum und Minimum in den teilnehmenden Laboratorien

Temperatureigenschaften

Im Laufe des Ringvergleiches wurden keine Untersuchungen zur Abhängigkeit des Transfergerätes in Bezug auf unterschiedliche Fluidtemperaturen durchgeführt.

Standardunsicherheit u_{Temp}

Aufgrund dieser fehlenden Daten wurde kein Wert für u_{Temp} angesetzt.

Für die Berechnung der E_N -Werte wurden die Messabweichungen e der teilnehmenden Laboratorien ohne eine Temperaturkorrektur übernommen.

6.3.2 Gerät #2_MID DN25

Laborbedingungen

Die Kalibrierungen in den teilnehmenden Laboren wurden bei Fluidtemperaturen zwischen 19,71 °C und 25,64 °C durchgeführt. Innerhalb eines Labors lag die maximale Spannweite, ausgedrückt als $\max(T_{\text{Fluid}}) - \min(T_{\text{Fluid}})$, bei 1,88 °C (Tabelle 28 und Abbildung 15).

Tabelle 28: Fluidtemperatur T_{Fluid} (°C) in den teilnehmenden Laboratorien - Kalibrierung Gerät #2 (MID DN25)

Labor Prüfstand Zeitraum	PTB_1 06/2017	PTB_2 02/2018	PTB_3 08/2018	Labor 1 Prüfstand 4 04/2018	Labor 3 Prüfstand 2 07/2018	Labor 5 05/2018
Max	20,14	20,16	20,39	25,64	24,80	23,70
Min	19,97	19,89	19,71	23,76	24,40	23,06
Max – Min	0,17	0,27	1,88	0,64	0,40	0,68
Mittelwert	20,03	19,95	20,01	24,93	24,55	23,31

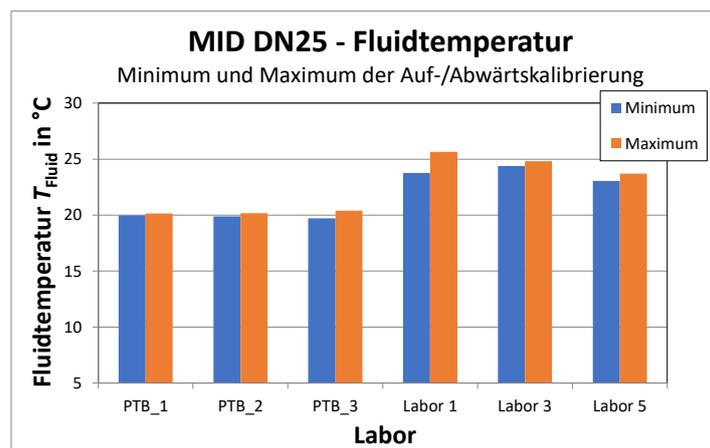


Abbildung 15: Fluidtemperaturen T_{fluid} während der Kalibrierung von Gerät #2 (MID DN25) - Maximum und Minimum in den teilnehmenden Laboratorien

Temperatureigenschaften

Die Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit wurden im August 2018 im Pilotlabor durchgeführt. Mit den Untersuchungen sollte festgestellt werden, wie sich das Transfergerät und dessen Messabweichungen auf Änderungen in der Fluidtemperatur im Vergleich zur vorgegebenen Nominaltemperatur (= 20 °C) verhält.

Im Ergebnis zeigt das MID keine systematische Abhängigkeit der Messabweichung von der Fluidtemperatur (Abbildung 16). Bei einer Temperaturdifferenz von +8,00 °C ergibt sich eine maximale Differenz in der Messabweichung von kleiner 0,04%, was einer Standardunsicherheit u_{Temp} von 0,012 % entspricht. Da die Temperatur in den teilnehmenden Laboratorien jedoch nur um +5,64 °C von der Nominaltemperatur (= 20 °C) im Pilotlabor abwich (Tabelle 28), ist von einer kleineren Unsicherheit in Folge der Temperatursensitivität des Gerätes auszugehen. Insofern handelt es sich bei den durchflussabhängigen Angaben von u_{Temp} in Tabelle 29 um konservativ angesetzte Werte.

Unsicherheit u_{Temp}

Die Temperatursensitivität der Messabweichung lässt sich mit der Differenz zur Messung bei Nominalbedingung bestimmen - Gleichungen (17) und (18). Separat für jeden Durchfluss wurden so maximale und minimale Differenzen bestimmt und, unter Annahme einer Rechteckverteilung, die Unsicherheiten u_{Temp} mittels Gleichung (19) berechnet (Tabelle 29).

Da das Gerät keine systematische Abhängigkeit von der Fluidtemperatur aufweist, wurden für die Berechnung von x_i , und somit auch für die abschließenden E_N -Werte, keine temperaturabhängigen Korrekturen der Messabweichungen e durchgeführt.

$$\Delta T_{Fluid} = T_{Fluid} - T_{nom} \quad (17)$$

- mit ΔT_{Fluid} - Differenz zwischen aktueller und nominaler Temperatur Kalibrierflüssigkeit (°C)
 T_{Fluid} - Aktuelle Temperatur Kalibrierflüssigkeit (°C)
 T_{nom} - Nominale Temperatur Kalibrierflüssigkeit = 20°C

$$\Delta e_{nom} = e - e_{nom} \quad (18)$$

- mit Δe_{nom} - Differenz der Messabweichung (%)
 e - Messabweichung nach Glg. (3) bei aktueller Fluidtemperatur (%)
 e_{nom} - Messabweichung bei nominaler Fluidtemperatur 20 °C (%)

$$u_{Temp} = \frac{\max(\Delta e_{nom}) - \min(\Delta e_{nom})}{2\sqrt{3}} \quad (19)$$

- mit u_{Temp} - Standardunsicherheit aufgrund von Temperaturabhängigkeiten (%)

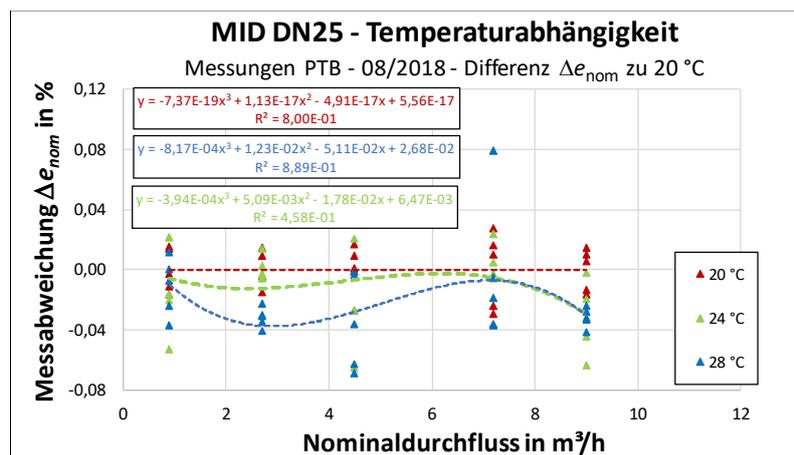


Abbildung 16: Temperaturabhängigkeit Gerät #2 (MID DN25) - Differenz der Messabweichung Δe_{nom} zu Kalibrierungen unter Nominalbedingungen ($T = 20^\circ\text{C}$)

Tabelle 29: Standardunsicherheiten u_{Temp} zur Temperatursensitivität von Gerät #2 (MID DN25)

	Nominaldurchfluss in m³/h									
	9,0	8,1	7,2	6,4	5,4	4,5	3,6	2,7	1,8	0,9
u_{Temp} in %	0,009	0,007	0,007	0,008	0,009	0,010	0,010	0,009	0,007	0,003

6.3.3 Gerät #3_Coriolis DN25

Laborbedingungen

Die Kalibrierungen in den teilnehmenden Laboren wurden bei Fluidtemperaturen zwischen 19,71 °C und 28,00 °C durchgeführt. Innerhalb eines Labors lag die maximale Spannweite, ausgedrückt als $\max(T_{\text{Fluid}}) - \min(T_{\text{Fluid}})$, bei 1,24 °C (Tabelle 30 und Abbildung 17).

Tabelle 30: Fluidtemperatur T_{Fluid} (°C) in den teilnehmenden Laboratorien - Kalibrierung Gerät #3 (Coriolis DN25)

Labor	PTB_1	PTB_2	PTB_3	Labor 1	Labor 1	Labor 2	Labor 3	Labor 5
Prüfstand				Prüfstand 1	Prüfstand 2		Prüfstand 1	
Zeitraum	06/2017	02/2018	08/2018	04/2018	04/2018	02/2018	07/2018	05/2018
Max	20,14	20,16	20,39	20,56	20,53	27,10	28,00	25,26
Min	19,97	19,89	19,71	20,49	20,49	26,70	27,34	24,02
Max – Min	0,17	0,27	0,68	0,07	0,04	0,40	0,70	1,24
Mittelwert	20,03	19,95	20,01	20,51	20,50	26,82	27,35	24,67

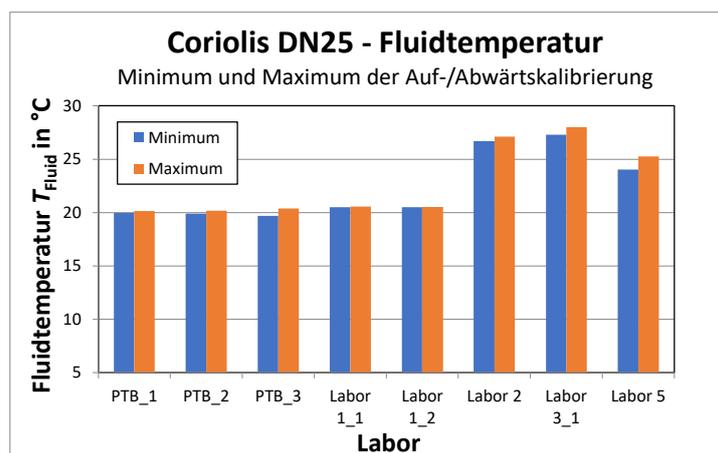


Abbildung 17: Fluidtemperaturen T_{Fluid} während der Kalibrierung von Gerät #3 (Coriolis DN25) - Maximum und Minimum in den teilnehmenden Laboratorien

Temperatureigenschaften

Die Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit wurden im August 2018 im Pilotlabor durchgeführt. Der hier untersuchte Coriolis zeigte eine systematische Abhängigkeit der Messabweichung von der Fluidtemperatur (Abbildung 18). Die Temperatur in den teilnehmenden Laboratorien wich um bis zu + 8,00 °C von der Nominaltemperatur (= 20 °C) im Pilotlabor ab (Tabelle 30). Diese Abweichung entspricht in Kombination mit der beobachteten Temperaturabhängigkeit des Coriolis, einer Verschiebung der Messabweichung von bis zu -0,095 % (bei 0,90 t/h in Abbildung 18), was wiederum eine Standardunsicherheit u_{Temp} von 0,027 % ergibt (Abbildung 20). Dieser hohe Wert von u_{Temp} verdeutlicht die Notwendigkeit einer Temperaturkorrektur der ermittelten Messabweichungen. Das dazu notwendige Vorgehen wird im Folgenden erläutert.

Die Korrektur basiert auf dem Verhältnis zwischen a) der Differenz ΔT_{Fluid} aus aktueller Fluidtemperatur T_{Fluid} zu nominaler Temperatur T_{nom} (Gleichung 17) sowie b) der Differenz Δe_{nom} aus der Messabweichung e bei aktuellen Fluidtemperaturen zur Messabweichung e_{nom} bei Nominalbedingungen (Gleichung 18). Aus Abbildung 18 geht deutlich hervor, dass der

untere Durchflussbereich sich in diesem Zusammenhang nicht linear verhält. Da zwischen den einzelnen Temperaturmessungen kein neuer Nullpunktgleich vorgenommen wurde, ist der Einfluss des Autozero-Effektes hier klar zu erkennen. Um die Temperaturabhängigkeit des Gerätes vom Autozero-Effekt zu trennen, wurden für die Temperaturkorrektur ausschließlich Messwerte bei Durchflüssen von $\geq 2,7$ t/h verwendet. Für jeden Temperaturbereich erfolgte die Bestimmung des Korrekturwertes Δe_{korr} durch das Anpassen einer Polynomfunktion 2. Grades (Gleichung 20, Abbildung 19) und Ableiten entsprechender Modellparameter (Tabelle 31). Die abschließende Korrektur der Messabweichungen e zu e_{korr} erfolgt **für alle Durchflüsse einheitlich** mittels Gleichung (21).

Auch an dieser Stelle sei noch einmal darauf verwiesen, dass die gezeigten Ergebnisse nur für das hier untersuchte Gerät gültig sind und nicht ohne Weiteres auf andere Durchflusssensoren und Messbedingungen übertragen werden können.

Des Weiteren berücksichtigen die vorliegenden Auswertungen keine Betrachtungen zum Einfluss der Lufttemperatur, d. h. der Differenz zwischen Luft- und Fluidtemperatur. Es ist zu vermuten, dass die hier beobachteten Abweichungen ggf. zum Teil auch von diesem Effekt beeinflusst wurden. Dazu müssten zukünftig jedoch noch zusätzliche Untersuchungen, z. B. in einer Klimakammer, durchgeführt werden.

$$\Delta e_{\text{korr}} = a + b \cdot \Delta T_{\text{Fluid}} + c \cdot \Delta T_{\text{Fluid}}^2 \quad (20)$$

mit Δe_{korr} - Korrekturwert für die Messabweichung (%)
 a, b, c - Parameter der angepassten Polynomfunktion aus Tabelle 31

$$e_{\text{korr}} = e - \Delta e_{\text{korr}} \quad (21)$$

mit e_{korr} - Temperaturkorrigierte Messabweichung (%)

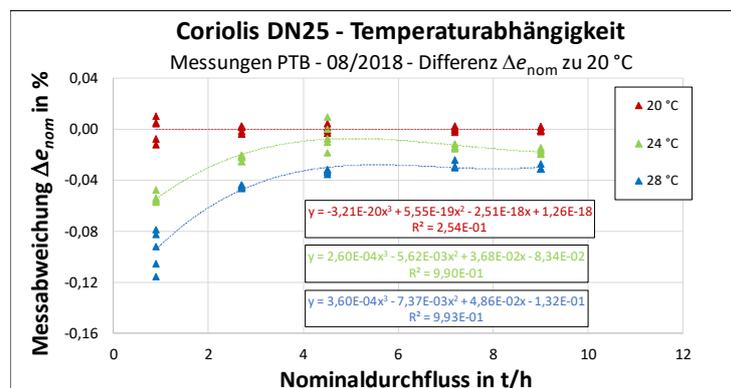


Abbildung 18: Temperaturabhängigkeit Gerät #3 (Coriolis DN25) - Differenz der Messabweichung Δe_{nom} zu Kalibrierungen unter Nominalbedingungen ($T = 20^\circ\text{C}$)

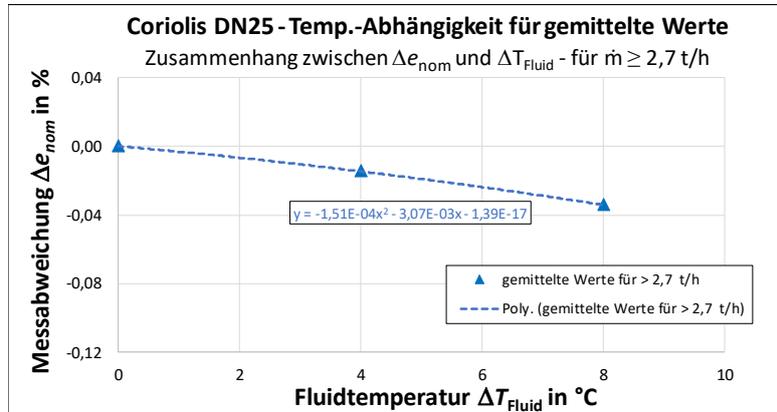


Abbildung 19: Temperaturabhängigkeit Gerät #3 (Coriolis DN25) - Zusammenhang zwischen ΔT_{Fluid} und Δe_{nom} als Mittelwert der Abweichungen für die Durchflüsse $\geq 2,7$ t/h (Gleichung 17 und Gleichung 18) zur Bestimmung der Modellparameter in Gleichung (20)

Tabelle 31: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Modellparameter für eine temperaturabhängige Korrektur der Messabweichung e (Anwendung der Gleichungen(17 bis 21)).

	Nominaldurchfluss
Modellparameter	0,9 t/h bis 9,0 t/h
a	2,60E-18
b	-3,07E-03
c	-1,51E-04

Unsicherheit u_{Temp}

Die Berechnung von u_{Temp} basiert auf der folgenden Vorgehensweise und den damit verbundenen Annahmen. Die Fluidtemperatur T_{Fluid} in den teilnehmenden Laboratorien wich nicht mehr als $+8,0$ °C von der Nominaltemperatur im Pilotlabor ab (Abbildung 17). Wie zuvor gezeigt, wies die Messabweichung des Coriolis eine charakteristische Temperaturabhängigkeit auf. Die Temperatursensitivität der originalen bzw. korrigierten Messabweichung ließ sich mit der Differenz zur Messung bei Nominalbedingung bestimmen (Gleichung 18). Unter Annahme einer Rechteckverteilung wurden aus diesen Differenzen die Unsicherheiten u_{Temp} mittels Gleichung (19) berechnet.

Eine Anwendung der beschriebenen Methodik führt beim Coriolis zu einer deutlichen Reduzierung der Unsicherheit u_{Temp} von bis zu 85 % (Abbildung 20).

Für die Berechnung der E_N -Werte wurden alle Messabweichungen e der teilnehmenden Laboratorien nach dem beschriebenen Verfahren zu e_{kor} korrigiert (Gleichungen 17 bis 21). Für den Coriolis DN25 werden zur Berechnung von u_{Temp} die in Tabelle 32 angegebenen durchflussabhängigen Werte verwendet.

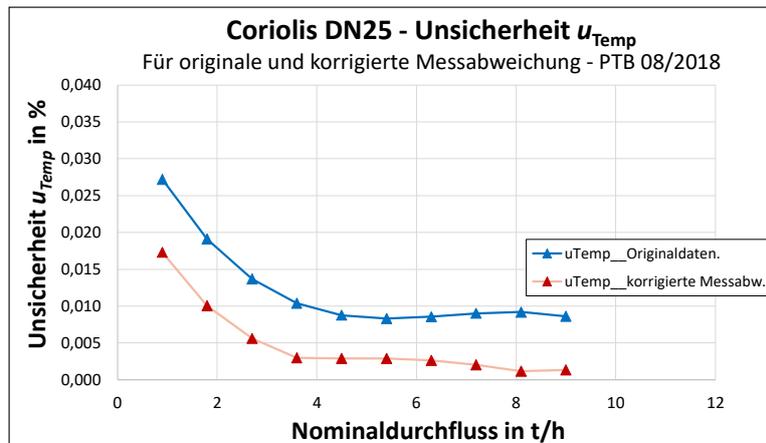


Abbildung 20: Unsicherheit u_{Temp} für Gerät #3_Coriolis DN25 - berechnet aus Originaldaten e bzw. aus temperaturkorrigierten Werten e_{korrr} der Messabweichung im Pilotlabor für Charakterisierungsmessungen im August 2018 - basierend auf den Gleichungen (17) bis (21).

Tabelle 32: Standardunsicherheiten u_{Temp} zur Temperatursensitivität von Gerät #3 (Coriolis DN25)

	Nominaldurchfluss in t/h									
	9,0	8,1	7,2	6,4	5,4	4,5	3,6	2,7	1,8	0,9
u_{Temp} in %	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,006	0,010	0,017

6.3.4 Gerät #4_Turbine DN150

Laborbedingungen

Die Kalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien wurden bei Fluidtemperaturen zwischen 19,89 °C und 25,39 °C durchgeführt. Innerhalb eines Labors lag die maximale Spannweite, ausgedrückt als $\max(T_{Fluid}) - \min(T_{Fluid})$, bei 1,90 °C (Tabelle 33 und Abbildung 21).

Tabelle 33: Fluidtemperatur T_{Fluid} (°C) in den teilnehmenden Laboratorien - Kalibrierung Gerät #4 (Turbine DN150)

Labor	PTB_1	PTB_2	PTB_3	Labor 1
Prüfstand				Prüfstand 3
Zeitraum	08/2017	03/2018	07/2018	04/2018
Max	20,12	20,08	20,06	25,39
Min	19,89	19,93	19,87	23,48
Max – Min	0,23	0,15	0,19	1,90
Mittelwert	20,01	20,02	19,99	24,48

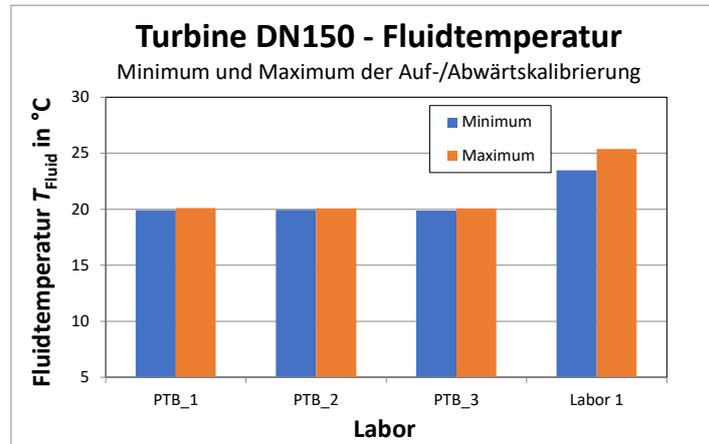


Abbildung 21: Fluidtemperaturen T_{Fluid} während der Kalibrierung von Gerät #4 (Turbine DN150) - Maximum und Minimum in den teilnehmenden Laboratorien

Temperatureigenschaften

Die Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit wurden im September 2018 im Pilotlabor durchgeführt. Im Ergebnis zeigte die Turbine eine systematische Abhängigkeit der Messabweichung von der Fluidtemperatur (Abbildung 22). Bei einer Temperaturdifferenz von +6,00 °C ergibt sich eine maximale Differenz in der Messabweichung von bis zu 0,16 %, was einer Standardunsicherheit u_{Temp} von 0,047 % entspricht. Dieser Wert unterstreicht die Notwendigkeit einer temperaturabhängigen Korrektur der Messwerte.

Analog zum Vorgehen in Kapitel 6.3.3 wurden auch für die Turbine Parameter zur Korrektur der berechneten Messabweichungen ermittelt (Tabelle 34). Da jedoch in diesem Fall das Setzen einer Autozero-Korrektur nicht relevant ist, wurde eine Auswertung separat für jeden Durchfluss durchgeführt.

Tabelle 34: Gerät #4_Turbine DN150 - Modellparameter für eine temperaturabhängige Korrektur der Messabweichung e (Anwendung der Gleichungen 13 bis 21).

Modellparameter	Nominaldurchfluss in m³/h				
	600,0	540,0	480,0	420,0	360,0
a	-2,20E-05	-9,14E-03	-1,24E-02	-1,15E-02	-7,76E-03
b	2,66E-02	1,43E-02	8,72E-03	7,80E-03	9,54E-03
c	5,81E-05	1,84E-03	2,35E-03	1,94E-03	9,96E-04

Modellparameter	Nominaldurchfluss in m³/h				
	300,0	240,0	180,0	120,0	60,0
a	-2,80E-03	1,85E-03	4,68E-03	4,16E-03	-1,23E-03
b	1,19E-02	1,30E-02	1,07E-02	3,09E-03	-1,19E-02
c	-1,25E-04	-1,05E-03	-1,41E-03	-8,38E-04	1,04E-03

Unsicherheit u_{Temp}

Auch zur Turbine wurde die Temperatursensitivität mit den Gleichungen (17) und (18) bestimmt bzw. die Unsicherheiten nach Gleichung (19). Eine Anwendung der beschriebenen Methodik zur Korrektur der Messabweichung führt bei der Turbine ebenfalls zu einer deutlichen Reduzierung der Unsicherheit u_{Temp} (Abbildung 23). Alle berechneten Werte von u_{Temp} sind nach der Korrektur kleiner als 0,005 %, weshalb für die Turbine über den gesamten Durchflussbereich ein konstanter Wert von 0,005 % für u_{Temp} angesetzt wurde.

Für die Berechnung der E_N -Werte wurden alle Messabweichungen e der teilnehmenden Laboratorien nach dem beschriebenen Verfahren zu e_{korrr} korrigiert (Gleichungen 17 bis 21).

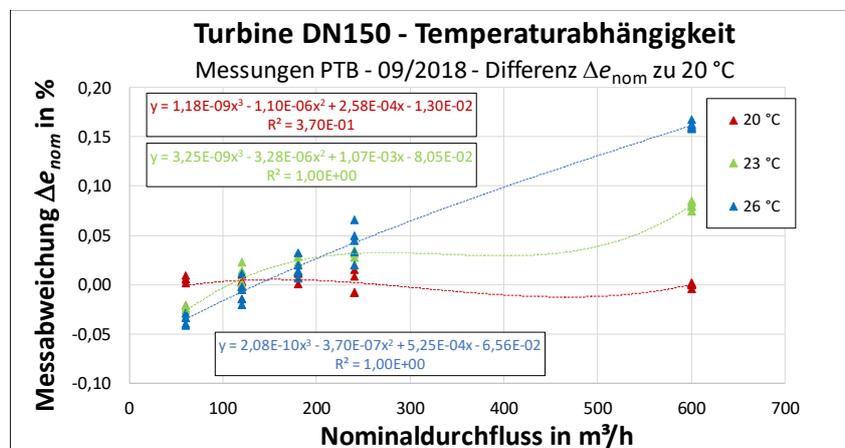


Abbildung 22: Temperaturabhängigkeit Gerät #4 (Turbine DN150) - Differenz der Messabweichung Δe_{nom} zu Kalibrierungen unter Nominalbedingungen ($T = 20^\circ C$)

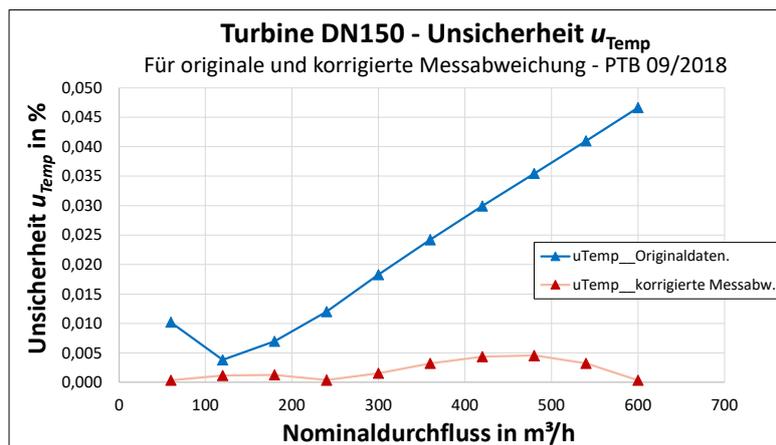


Abbildung 23: Unsicherheit u_{Temp} für Gerät #4 (Turbine DN150) - berechnet aus den Originaldaten e bzw. aus den temperaturkorrigierten Werten e_{korrr} der Messabweichungen im Pilotlabor für Charakterisierungsmessungen im September 2018 - basierend auf den Gleichungen (17) bis (21) und Tabelle 34

6.4 Druckabhängigkeit - Unsicherheit u_{Druck}

6.4.1 Gerät #1_Turbine DN15

Laborbedingungen

Die Durchflussskalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien wurden bei Prozessdrücken zwischen 2,81 bar und 3,29 bar durchgeführt (Abbildung 24 und Tabelle 35) - gemessen als Überdruck vor der Turbine.

Tabelle 35: Überdruck p_{Proz} (bar) in der Messstrecke während der Kalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien

Labor	Labor 4	Labor 2	Labor 4
Prüfstand			
Zeitraum	11/2017	01/2018	12/2020
Max	3,05	3,29	3,00
Min	2,99	2,81	3,00
Max – Min	0,06	0,48	0,00
Mittelwert	3,01	3,09	3,00

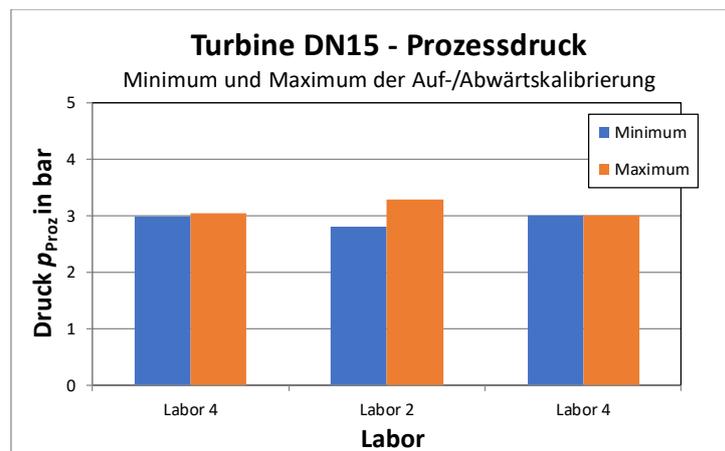


Abbildung 24: Kalibrierung Gerät #1 (Turbine DN15) - Druckbedingungen p_{Proz} in der Messstrecke (gemessen als Überdruck vor dem Gerät). Maximum und Minimum in den teilnehmenden Laboratorien

Druckeigenschaften

Im Laufe des Ringvergleiches wurden keine Untersuchungen zur Abhängigkeit des Transfergerätes in Bezug auf unterschiedliche Prozessdrücke durchgeführt.

Unsicherheit u_{Druck}

Aufgrund dieser fehlenden Daten wurde kein Wert für u_{Druck} angesetzt.

Für die Berechnung der E_N -Werte wurde keine Druckkorrektur der berichteten Messabweichungen e vorgenommen.

6.4.2 Gerät #2_MID DN25

Laborbedingungen

Die Durchflusskalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien wurden bei Prozessdrücken zwischen 0,19 bar und 3,87 bar durchgeführt (Abbildung 26 und Tabelle 37) - gemessen als Überdruck hinter dem MID-Gerät.

Tabelle 36: Überdruck p_{Proz} (bar) in der Messstrecke während der Kalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien

Labor	PTB_1	PTB_2	PTB_3	Labor 1	Labor 3	Labor 5
Prüfstand				Prüfstand 4	Prüfstand 2	
Zeitraum	06/2017	02/2018	08/2018	04/2018	07/2018	05/2018
Max	3,87	3,87	3,87	0,42	1,41	3,00
Min	3,01	3,00	2,94	0,19	0,99	2,80
Max – Min	0,86	0,87	0,93	0,23	0,42	0,20
Mittelwert	3,02	3,01	3,01	0,30	1,08	2,81

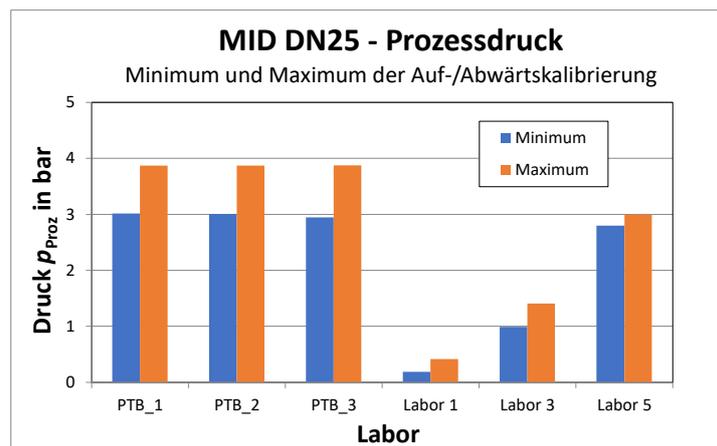


Abbildung 25: Kalibrierung Gerät #2 (MID DN25) - Druckbedingungen p_{Proz} in der Messstrecke (gemessen als Überdruck nach dem Gerät). Maximum und Minimum in den teilnehmenden Laboratorien

Geräteigenschaften

Die Druckabhängigkeit des MID wurde bei Messungen im August 2018 im Pilotlabor untersucht. Aus technischen Gründen konnten während der Charakterisierungsmessungen die Einstellungen des Prozessdruckes nach dem Gerät nicht auf die nominalen Bedingungen von 2 bar, 3 bar bzw. 4 bar fixiert eingestellt werden. Eine Auswertung der Druckabhängigkeiten erfolgte deshalb separat für jeden Nominal-Durchfluss und den dafür gültigen Prozessdruck (Abbildung 26). Entsprechend der vorliegenden Druckverhältnisse wurde die Spannbreite (Max – Min) für Druck und Messabweichung ausgewertet.

Das Gerät zeigte bei Durchflüssen größer 0,9 m³/h eine Sensitivität der Messabweichung bei veränderten Überdruckverhältnissen von bis zu ±0,010 %. Im untersten Durchflussbereich stieg die Druckabhängigkeit der Messabweichung auf ±0,020 % an. Eine systematische Abweichung wurde nicht beobachtet.

Unsicherheit u_{Druck}

Die beobachtete Sensitivität von $\pm 0,010\%$ bzw. $\pm 0,020\%$ wurde für die Berechnung von u_{Druck} verwendet: für $\dot{V} \geq 2,7 \text{ m}^3/\text{h}$ $u_{\text{Druck}} = 0,006\% = 0,010\% / \sqrt{3}$ bzw. für $\dot{V} < 2,7 \text{ m}^3/\text{h}$ $u_{\text{Druck}} = 0,012\% = 0,020\% / \sqrt{3}$, jeweils unter Annahme einer Rechteckverteilung.

Aufgrund der nicht vorhandenen Systematik wurde für die Berechnung der E_N -Werte keine Druckkorrektur der berichteten Messabweichungen e vorgenommen.

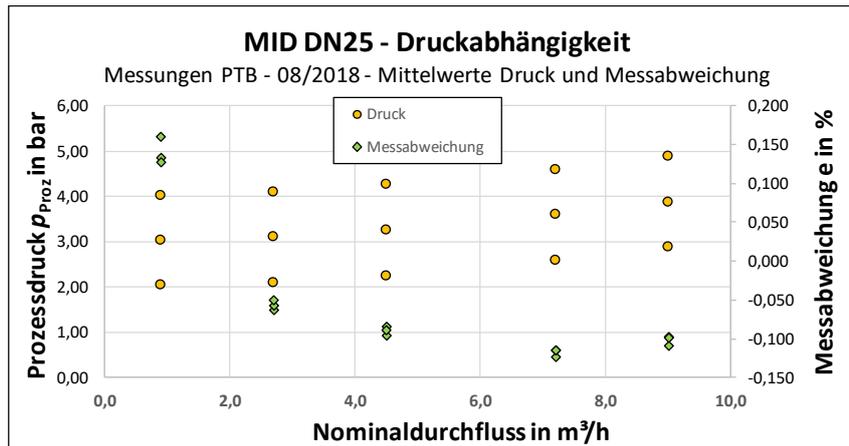


Abbildung 26: Druckabhängigkeit Gerät #2 (MID DN25) - mittlere Werte für die Überdruckbedingungen und den dabei festgestellten mittleren Messabweichungen

6.4.3 Gerät #3_Coriolis DN25

Laborbedingungen

Die Durchflusskalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien wurden bei Drücken zwischen 2,07 bar und 3,14 bar durchgeführt (Abbildung 27 und Tabelle 37) - gemessen als Überdruck hinter dem Coriolis-Gerät.

Tabelle 37: Überdruck p_{Proz} (bar) in der Messstrecke während der Kalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien

Labor	PTB_1	PTB_2	PTB_3	Labor 1	Labor 1	Labor 2	Labor 3	Labor 5
Prüfstand				Prüfstand 1	Prüfstand 2		Prüfstand 1	
Zeitraum	06/2017	02/2018	08/2018	04/2018	04/2018	02/2018	07/2018	05/2018
Max	3,14	3,11	3,06	3,09	3,03	2,70	3,07	2,97
Min	2,95	2,82	2,93	2,94	2,94	2,57	2,86	2,07
Max – Min	0,19	0,29	0,13	0,14	0,09	0,13	0,21	0,90
Mittelwert	2,99	3,00	2,99	2,97	2,95	2,61	2,86	2,08

Geräteeigenschaften

Die Druckabhängigkeit des Coriolis wurde bei Messungen im August 2018 im Pilotlabor untersucht. Im Vergleich zu Kalibrierungen bei 3 bar zeigte das Gerät eine sehr geringe Sensitivität der Messabweichung auf veränderte Überdruckverhältnisse (Abbildung 28).

Im Mittel änderte sich die Messabweichung e_{korr} nicht mehr als $\pm 0,010\%$, wenn der Druck in der Rohrleitung um ± 1 bar vom Nominalwert 3 bar abwich.

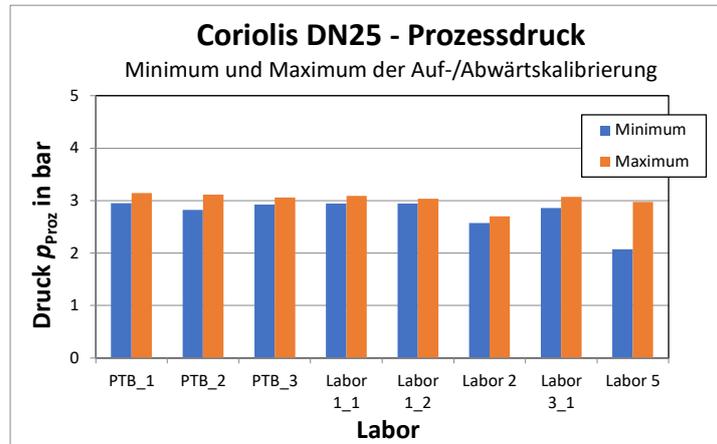


Abbildung 27: Kalibrierung Gerät #3 (Coriolis DN25) - Druckbedingungen p_{Proz} in der Messstrecke (gemessen als Überdruck nach dem Gerät). Maximum und Minimum in den teilnehmenden Laboratorien

Unsicherheit u_{Druck}

Die beobachtete Sensitivität von $\pm 0,010\%$ wird für die Berechnung von u_{Druck} verwendet:
 $u_{\text{Druck}} = 0,006\% = 0,010\% / \sqrt{3}$, unter Annahme einer Rechteckverteilung und gültig über den gesamten Durchflussbereich.

Aufgrund der geringen Drucksensitivität des Gerätes wurde für die Berechnung der E_N -Werte keine Druckkorrektur der berichteten Messabweichungen e vorgenommen.

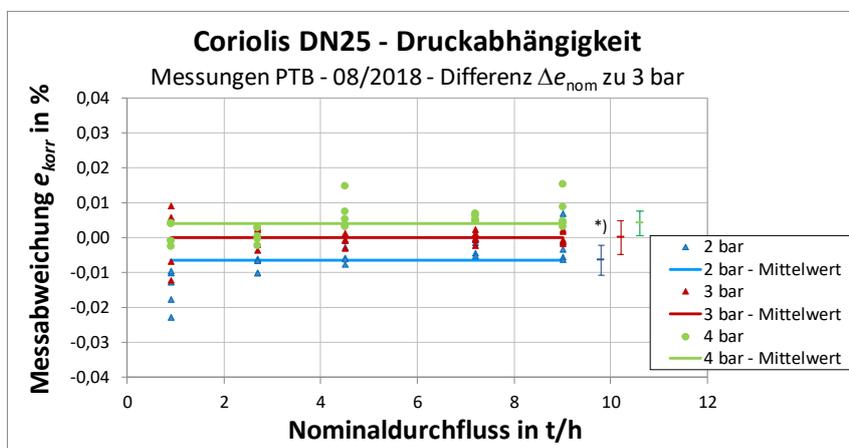


Abbildung 28: Druckabhängigkeit Gerät #3 (Coriolis DN25) - Residuen zum Mittelwert der druckkorrigierten Messabweichung e_{korr} bei 3 bar.

*) steht für die Standardabweichung von e_{korr} bei den einzelnen Druckstufen

6.4.4 Gerät #4_Turbine DN150

Laborbedingungen

Die Durchflusskalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien wurden bei Prozessdrücken zwischen 0,40 bar und 3,03 bar durchgeführt (Abbildung 29 und Tabelle 38) - gemessen als Überdruck hinter der Turbine.

Tabelle 38: Überdruck p_{Proz} (bar) in der Messstrecke während der Kalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien

Labor	PTB_1	PTB_2	PTB_3	Labor 1
Prüfstand				Prüfstand 3
Zeitraum	08/2017	03/2018	07/2018	04/2018
Max	3,02	3,03	3,02	0,80
Min	2,97	2,98	2,98	0,40
Max – Min	0,05	0,05	0,04	0,40
Mittelwert	3,00	3,00	3,00	0,63

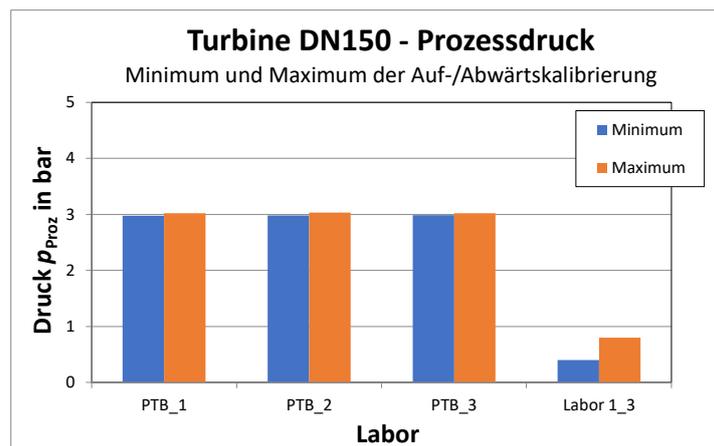


Abbildung 29: Kalibrierung Gerät #4 (Turbine DN150) - Druckbedingungen p_{Proz} in der Messstrecke (gemessen als Überdruck nach dem Gerät). Maximum und Minimum der Messungen in den teilnehmenden Laboratorien

Geräteeigenschaften

Die Druckabhängigkeit der Turbine wurde bei Messungen im September 2018 im Pilotlabor untersucht. Das Gerät zeigte eine Sensitivität der Messabweichung auf veränderte Überdruckverhältnisse (Abbildung 30), jedoch ohne erkennbare Systematik.

Im Mittel änderte sich die Messabweichung e_{korr} nicht mehr als $\pm 0,020\%$, wenn der Druck in der Rohrleitung um ± 1 bar vom Nominalwert 3 bar abwich.

Unsicherheit u_{Druck}

Die beobachtete Sensitivität von $\pm 0,020\%$ wurde für die Berechnung von u_{Druck} verwendet: $u_{\text{Druck}} = 0,012\% = 0,020\% / \sqrt{3}$, unter Annahme einer Rechteckverteilung und gültig über den gesamten Durchflussbereich.

Aufgrund der nicht nachweisbaren Systematik wurde für die Berechnung der E_N -Werte keine Druckkorrektur der berichteten Messabweichungen e vorgenommen.

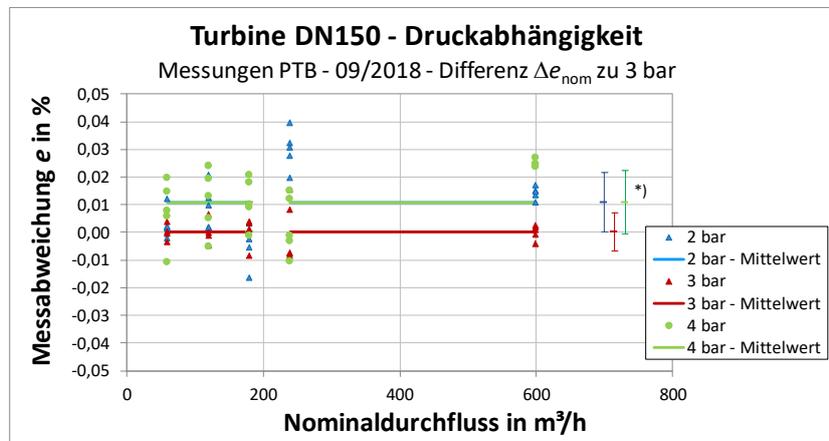


Abbildung 30: Druckabhängigkeit Gerät #4 (Turbine DN150) - Residuen zum Mittelwert der Messabweichung e_{korrr} bei 3 bar.

*) steht für die Standardabweichung von e_{korrr} bei den einzelnen Druckstufen

6.5 Durchflussstabilität - Unsicherheit u_{Stab}

6.5.1 Gerät #1_Turbine DN15

Laborbedingungen

Während der Durchflusskalibrierungen wich der Referenzdurchfluss in den teilnehmenden Laboratorien zwischen +1,16 % und -0,32 % von den vorgegebenen Nominaldurchflüssen ab (Abbildung 31).

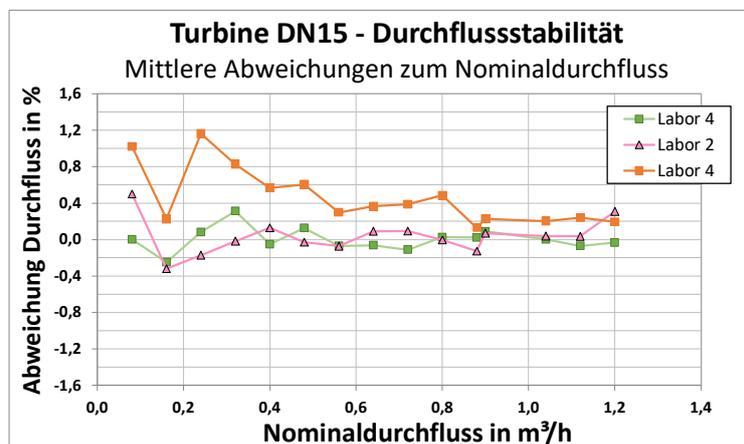


Abbildung 31: Kalibrierung Gerät #1 (Turbine DN15) - Durchflussstabilität, angegeben als mittlere Abweichung des Referenzdurchflusses im Vergleich zum vorgegebenen Nominaldurchfluss

Geräteigenschaften

Für die Untersuchung der Sensibilität der Turbine auf mögliche Durchflussschwankungen wurden Kalibrierdaten aus Labor 4 verwendet (11/2017). Basierend auf der Kalibrierkurve, wurden die Referenzdurchflüsse um bis zu $\pm 2,0$ % rechnerisch variiert und die Sensitivität der Messabweichung festgestellt (Abbildung 32).

Die Turbine zeigte im Bereich der kleinsten Durchflüsse die stärkste Sensitivität auf Abweichungen im Referenzdurchfluss.

Unsicherheit u_{Stab}

Aus Abbildung 31 geht hervor, dass die Referenzdurchflüsse in den teilnehmenden Laboratorien nicht mehr als $\pm 1,20\%$ vom Nominaldurchfluss abgewichen sind. Basierend auf den modellierten Sensitivitäten führt diese Abweichung zu einer maximalen Differenz in der Messabweichung von bis zu $\pm 0,010\%$ (Abbildung 32). Mit diesem Wert wurde die Unsicherheit u_{Stab} berechnet: $u_{\text{Stab}} = 0,006\% = 0,010\% / \sqrt{3}$, jeweils unter Annahme einer Rechteckverteilung und gültig für den gesamten Durchflussbereich.

Für die Berechnung der E_N -Werte wurde keine Korrektur der berichteten Messabweichungen in Bezug auf die Abweichung des Referenz- vom Nominaldurchfluss vorgenommen.

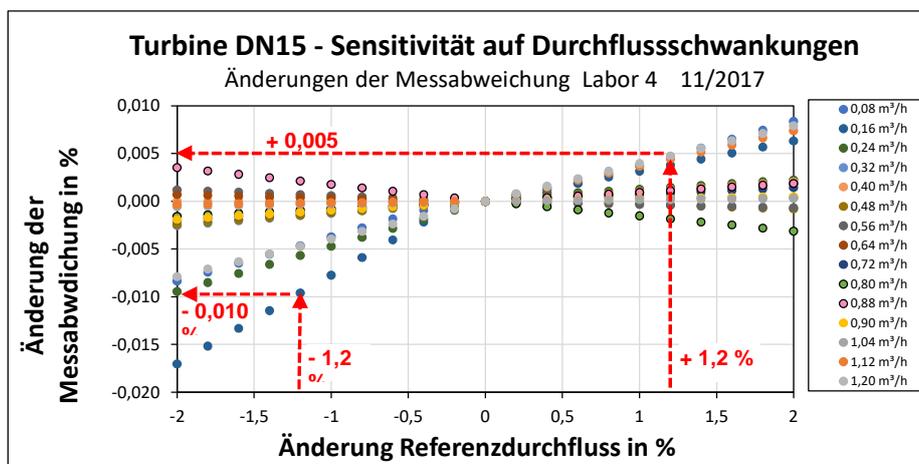


Abbildung 32: Sensitivität von Gerät #1 (Turbine DN15) in Bezug auf Durchflussschwankungen - modellierte Abhängigkeiten der Messabweichung auf Schwankungen im Referenzdurchfluss

6.5.2 Gerät #2_MID DN25

Laborbedingungen

Während der Durchflusskalibrierungen wich der Referenzdurchfluss in den teilnehmenden Laboratorien zwischen $+2,65\%$ und $-0,76\%$ von den vorgegebenen Nominaldurchflüssen ab (Abbildung 33).

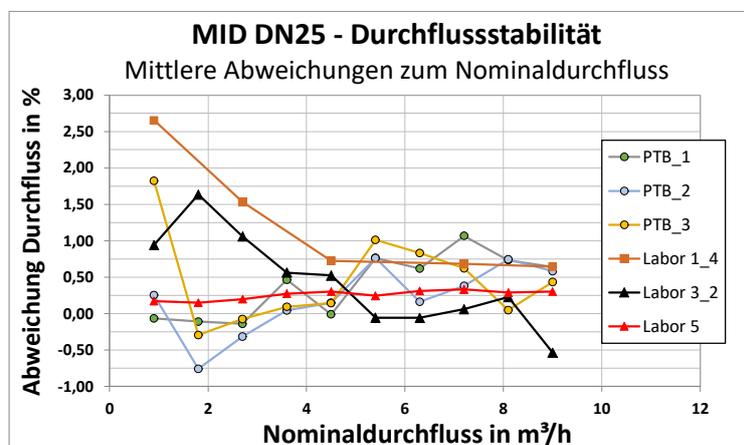


Abbildung 33: Kalibrierung Gerät #2 (MID DN25) - Durchflussstabilität, angegeben als mittlere Abweichung des Referenzdurchflusses im Vergleich zum vorgegebenen Nominaldurchfluss

Geräteeigenschaften

Für die Untersuchung der Sensibilität des MID auf mögliche Durchflussschwankungen wurden Kalibrierdaten aus dem Pilotlabor verwendet (02/2018). Basierend auf der Kalibrierkurve, wurden die Referenzdurchflüsse um bis zu $\pm 4,0\%$ rechnerisch variiert und die Sensitivität der Messabweichung festgestellt (Abbildung 34).

Das MID zeigte im Bereich der kleinsten Durchflüsse die stärkste Sensitivität auf Abweichungen im Referenzdurchfluss.

Unsicherheit u_{Stab}

Aus Abbildung 33 geht hervor, dass die Referenzdurchflüsse in den teilnehmenden Laboratorien nicht mehr als $\pm 3,0\%$ vom Nominaldurchfluss abgewichen sind. Basierend auf den modellierten Sensitivitäten führt diese Abweichung zu einer maximalen Differenz in der Messabweichung von bis zu $\pm 0,003\%$ (Abbildung 34). Mit diesem Wert wurde die Unsicherheit u_{Stab} berechnet: $u_{\text{Stab}} = 0,002\% = 0,003\% / \sqrt{3}$, jeweils unter Annahme einer Rechteckverteilung und gültig für den gesamten Durchflussbereich.

Für die Berechnung der E_N -Werte wurde keine Korrektur der berichteten Messabweichungen in Bezug auf die Abweichung des Referenz- vom Nominaldurchfluss vorgenommen.

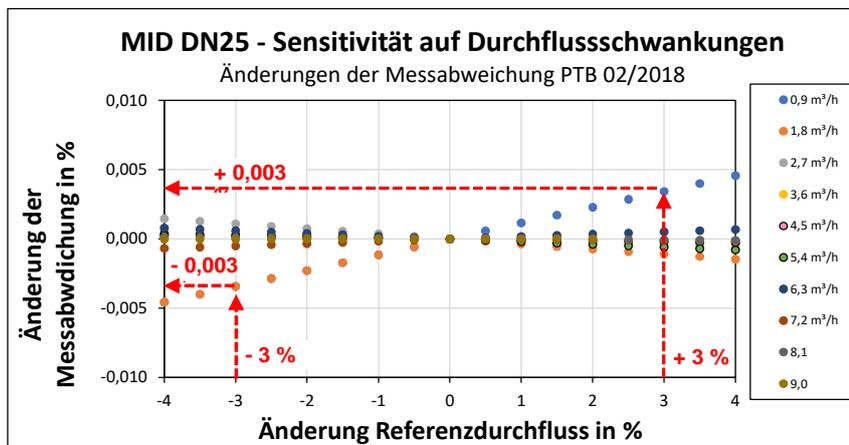


Abbildung 34: Sensitivität von Gerät #2 (MID DN25) in Bezug auf Durchflussschwankungen - modellierte Abhängigkeiten der Messabweichung auf Schwankungen im Referenzdurchfluss

6.5.3 Gerät #3_Coriolis DN25

Laborbedingungen

Während der Durchflusskalibrierungen wich der Referenzdurchfluss in den teilnehmenden Laboratorien zwischen +2,21 % und -8,14 % von den vorgegebenen Nominaldurchflüssen ab, jeweils bezogen auf mittlere Abweichungen je Durchflussspunkt (Abbildung 35).

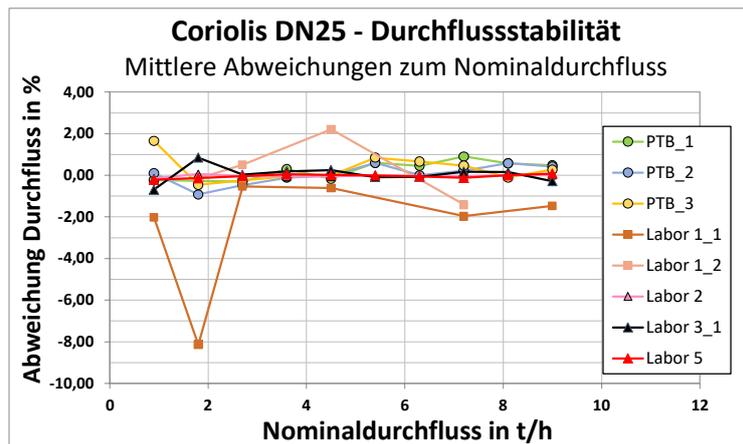


Abbildung 35: Kalibrierung von Gerät #3 (Coriolis DN25) - Durchflusstabilität, angegeben als mittlere Abweichung des Referenzdurchflusses im Vergleich zum vorgegebenen Nominaldurchfluss

Geräteigenschaften

Für die Untersuchung der Sensibilität des Coriolis auf mögliche Durchflussschwankungen wurden Kalibrierdaten aus dem Pilotlabor verwendet (02/2018). Basierend auf der Kalibrierkurve, wurden die Referenzdurchflüsse um bis zu $\pm 10,0$ % rechnerisch variiert und die Sensitivität der Messabweichung festgestellt (Abbildung 36).

Der Coriolis zeigte im Bereich von Durchflüssen $\leq 2,7$ t/h die stärkste Sensitivität auf Abweichungen im Referenzdurchfluss.

Unsicherheit u_{Stab}

Aus Abbildung 35 geht hervor, dass die Referenzdurchflüsse in den teilnehmenden Laboratorien nicht mehr als $\pm 9,0$ % vom Nominaldurchfluss abweichen. Basierend auf den modellierten Sensitivitäten (Abbildung 36) führt diese Abweichung zu einer maximalen Differenz in der Messabweichung von bis zu $\pm 0,004$ %. Mit diesem Wert wurde die Unsicherheit u_{Stab} berechnet: $u_{\text{Stab}} = 0,002 \text{ \%} = 0,004 \text{ \%} / \sqrt{3}$, jeweils unter Annahme einer Rechteckverteilung und gültig für den gesamten Durchflussbereich

Für die Berechnung der E_N -Werte wurde keine Korrektur der berichteten Messabweichungen e in Bezug auf die Abweichung des Referenz- vom Nominaldurchfluss vorgenommen.

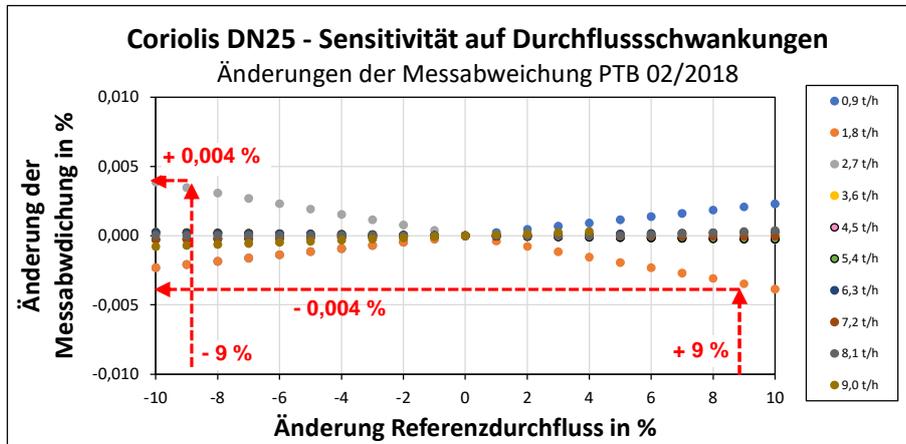


Abbildung 36: Sensitivität von Gerät #3_Coriolis DN25 in Bezug auf Durchflussschwankungen - modellierte Abhängigkeiten der Messabweichung auf Schwankungen im Referenzdurchfluss

6.5.4 Gerät #4_Turbine DN150

Laborbedingungen

Während der Durchflusskalibrierungen wich der Referenzdurchfluss in den teilnehmenden Laboratorien zwischen +1,99 % und -1,29 % von den vorgegebenen Nominaldurchflüssen ab (Abbildung 37).

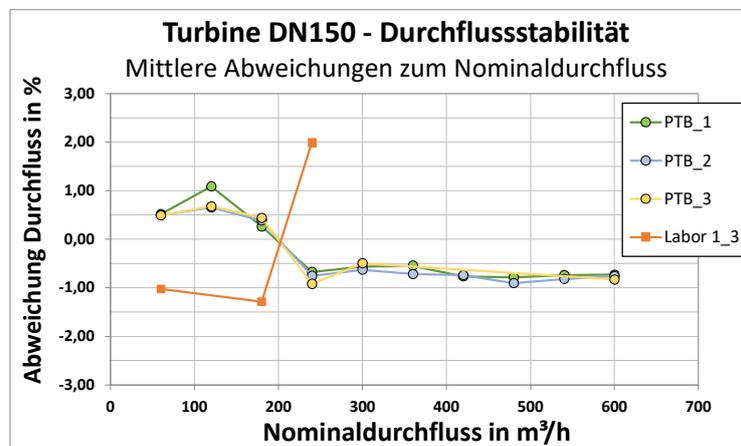


Abbildung 37: Kalibrierung von Gerät #4 (Turbine DN150) - Durchflusstabilität, angegeben als mittlere Abweichung des Referenzdurchflusses im Vergleich zum vorgegebenen Nominaldurchfluss

Geräteigenschaften

Für die Untersuchung der Sensibilität der Turbine auf mögliche Durchflussschwankungen wurden Kalibrierdaten aus dem Pilotlabor verwendet (02/2018). Basierend auf der Kalibrierkurve, wurden die Referenzdurchflüsse um bis zu $\pm 4,0$ % rechnerisch variiert und die Sensitivität der Messabweichung festgestellt (Abbildung 38).

Die Turbine zeigte im Bereich der kleinsten Durchflüsse die stärkste Sensitivität auf Abweichungen im Referenzdurchfluss.

Unsicherheit u_{Stab}

Aus Abbildung 37 geht hervor, dass die Referenzdurchflüsse in den teilnehmenden Laboratorien nicht mehr als $\pm 2,0\%$ vom Nominaldurchfluss abweichen. Basierend auf den modellierten Sensitivitäten (Abbildung 38) führt diese Abweichung im Durchfluss zu einer maximalen Differenz in der Messabweichung von bis zu $\pm 0,010\%$. Mit diesem Wert wurde die Unsicherheit u_{Stab} berechnet: $u_{\text{Stab}} = 0,006\% = 0,010\% / \sqrt{3}$, jeweils unter Annahme einer Rechteckverteilung und gültig für den gesamten Durchflussbereich.

Für die Berechnung der E_N -Werte wurde keine Korrektur der berichteten Messabweichungen e in Bezug auf die Abweichung des Referenz- vom Nominaldurchfluss vorgenommen.

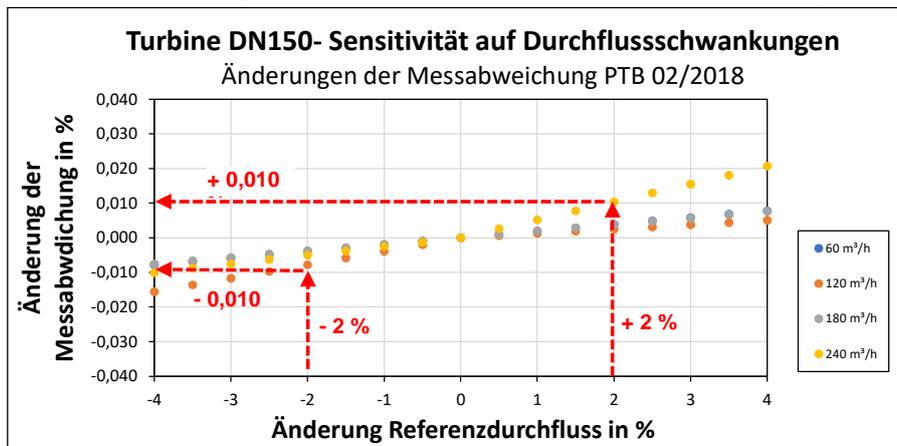


Abbildung 38: Sensitivität von Gerät #4 (Turbine DN150) in Bezug auf Durchflussschwankungen - modellierte Abhängigkeiten der Messabweichung auf Schwankungen im Referenzdurchfluss

6.6 Einfluss der Einlaufbedingungen - Unsicherheit u_{Einlauf}

6.6.1 Gerät #1_Turbine DN15

Laborbedingungen

Die Einlaufbedingungen der teilnehmenden Laboratorien sind in Tabelle 39 zusammengefasst.

Tabelle 39: Einlaufängen und Installationen im Zulauf zu Gerät #1 (Turbine DN15)

	Labor 2	Labor 4
Ungestörte Einlaufänge vor dem Gerätesetup	0,05 m	k. A.
Installation im Einlauf	Temperatursensor	k. A.

Geräteeigenschaften

Im Laufe des Ringvergleiches wurden keine Untersuchungen zur Abhängigkeit des Transfergerätes in Bezug auf unterschiedliche Einlaufbedingungen durchgeführt.

Unsicherheit u_{Einlauf}

Aufgrund dieser nicht vorhandenen Daten wurde kein Wert für u_{Einlauf} angesetzt.

Für die Berechnung der E_N -Werte wurde keine Korrektur der berichteten Messabweichungen e in Bezug auf die unterschiedlichen Einlaufbedingungen vorgenommen.

6.6.2 Gerät #2_MID DN25

Laborbedingungen

Die Einlaufbedingungen sind im Vergleich der teilnehmenden Laboratorien unterschiedlich. So lag die Einlauflänge (ohne Referenzlabor) ohne weitere Einbauten zwischen 0,23 m und 1,00 m (Tabelle 40), was einer Einlauflänge in etwa zwischen 9DN und 40DN entspricht.

Tabelle 40: Einlaufängen und Installationen im Zulauf zu Gerät #2 (MID DN25)

Labor Prüfstand	PTB	Labor 1 Prüfstand 4	Labor 3 Prüfstand 2	Labor 5
Ungestörte Einlauflänge	4,50 m	1,00 m	0,40 m	0,23 m
Installation im Einlauf	Reduzierung	Reduzierung	Reduzierung	Reduzierung, Gleichrichter 1,10 m im Vorlauf

Geräteigenschaften

Zur Charakterisierung der Gerätesensibilität auf unterschiedliche Einlaufbedingungen wurden spezielle Testmessungen durchgeführt. So wurden im Vorlauf zum Gerät ein Drallerzeuger (linksdrehend) und eine nach unten um 50 % geschlossene Blende verwendet, jeweils mit Einlaufängen von 0,50 m und 1,00 m, entsprechend einem Abstand von 20DN bzw. 40DN. Während die Blende nur einen geringen Einfluss auf die Messabweichung des MID hatte, wirkte sich der Drall deutlicher aus (Abbildung 39). Die maximalen Abweichungen im Vergleich zur Messung ohne Vorstörung lagen zwischen -0,02 % und +0,15 %.

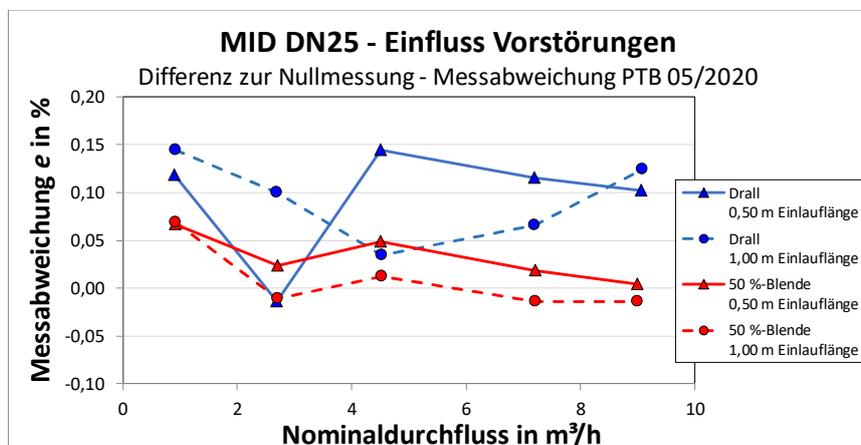


Abbildung 39: Sensitivität von Gerät #2 (MID DN25) in Bezug auf unterschiedliche Vorstörungen im Einlauf - Differenz der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung ohne Vorstörung

Unsicherheit u_{Einlauf}

Das Gerät zeigte eine starke Abhängigkeit der Messabweichung auf gestörte Einlaufbedingungen. Alle teilnehmenden Labore lagen im Bereich der untersuchten Einlaufängen von Abbildung 39 und wären somit abhängig von möglichen gestörten Einlaufbedingungen. Es ist davon auszugehen, dass die im Einlauf befindlichen Reduzierungen bzw. Gleichrichter (Tabelle 40) die beobachteten Auswirkungen der Vorstörungen abgemildert haben. Jedoch aufgrund der starken Abweichungen von bis zu 0,15 % ist trotzdem von einer negativen Beeinflussung des Gerätes auszugehen. Zwar beinhalten die Daten in Abbildung 39 auch Unsicherheiten zur Reproducibility u_{Reprod} , jedoch

lassen sich die starken Differenzen zur Nullmessung nicht alleine mit dem wiederholten Einbau des Messgerätes erklären. Basierend auf den festgestellten maximalen Differenzen in Abbildung 39, wurde die Unsicherheit u_{Einlauf} für das MID wie folgt berechnet: $u_{\text{Einlauf}} = 0,049 \% = (0,15 \% - (-0,02 \%)) / \sqrt{12}$, jeweils unter Annahme einer Rechteckverteilung und gültig für den gesamten Durchflussbereich.

Für die Berechnung der E_N -Werte wurde keine Korrektur der berichteten Messabweichungen e in Bezug auf die unterschiedlichen Einlaufbedingungen vorgenommen.

6.6.3 Gerät #3_Coriolis DN25

Laborbedingungen

Die unterschiedlichen Einlaufbedingungen in den teilnehmenden Laboratorien sind in Tabelle 41 zusammengefasst. Die ungestörte Einlauflänge (ohne Referenzlabor) variierte zwischen 0,23 m und 1,00 m, was einer Einlauflänge von in etwa 9DN bis 40DN entspricht.

Tabelle 41: Einlaufängen und Installationen im Zulauf zu Gerät #3 (Coriolis DN25)

Labor Prüfstand	PTB	Labor 1 Prüfstand 1	Labor 1 Prüfstand 2	Labor 2	Labor 3 Prüfstand 1	Labor 5
Ungestörte Einlauflänge	3,50 m	1,00 m		0,50 m	0,80 m	0,23 m
Installation im Einlauf	Referenz-MID DN25	Reduzierung		Reduzierung, Temp.-Sensor	Reduzierung	Reduzierung, Gleichrichter 1,10 m im Vorlauf

Geräteigenschaften

Der Coriolis wurde im Pilotlabor im Jahr 2020 hinsichtlich unterschiedlicher Einlaufbedingungen charakterisiert (Tabelle 13). Mit verschiedenen Vorstörungen und Einlaufängen wurde versucht, das Verhalten des Gerätes in Bezug auf extreme Vorstörungen ohne Streckenberuhigung (z. B. durch Gleichrichter oder Reduzierungen) näher zu beschreiben. Im Durchflussbereich $> 4 \text{ t/h}$ reagierte der Coriolis mit einer maximalen Verschiebung in der Messabweichung um bis zu $-0,04 \%$ auf den Einbau eines Dralls (Abbildung 40). Um unteren Durchflussbereich bei $< 4 \text{ t/h}$ zeigte die 50%-Blende die größten Auswirkungen auf die Messabweichung mit bis zu $+0,04\%$.

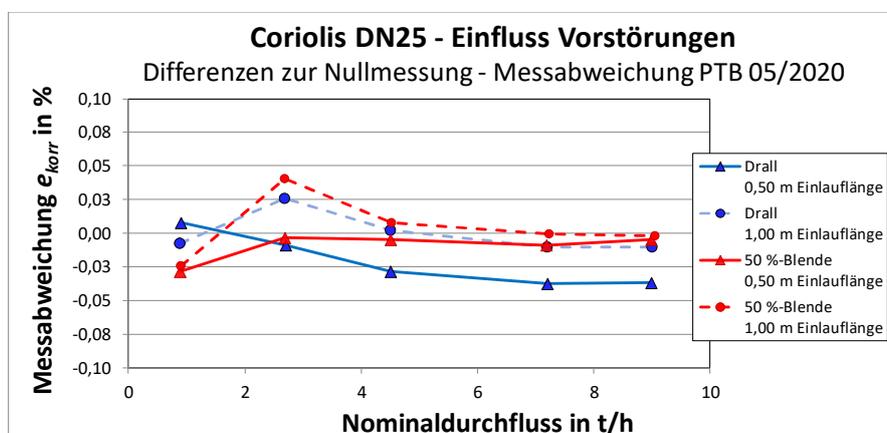


Abbildung 40: Sensitivität von Gerät #3 (Coriolis DN25) in Bezug auf unterschiedliche Vorstörungen im Einlauf - Differenz der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung ohne Vorstörung

Unsicherheit u_{Einlauf}

Das Gerät zeigt eine nachweisbare, jedoch geringe Abhängigkeit der Messabweichung in Bezug auf gestörte Einlaufbedingungen. Zwei der teilnehmenden Laboratorien liegen mit ihren Einlaufmängen im Bereich der 0,50-m-Messungen von Abbildung 40, und wären somit abhängig von gestörten Einlaufbedingungen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die im Pilotlabor beobachteten Auswirkungen einer Vorstörung auf die Messcharakteristik des Coriolis durch die im Einlauf befindlichen Reduzierungen bzw. Gleichrichter (Tabelle 41) noch weiter abgeschwächt wurden. Zusätzlich beinhalten die Daten in Abbildung 40 auch Unsicherheiten zur Reproducibility u_{Reprod} , da vor jeder Messung die Messstrecke geöffnet und wieder geschlossen werden musste. Somit würde eine ausschließliche Rückführung der beobachteten Abweichungen (Abbildung 40) auf die Unsicherheit u_{Einlauf} , zu einer Überschätzung dieses Beitrages führen.

Schlussfolgernd wird aus den genannten Gründen die Unsicherheit u_{Einlauf} für den Coriolis im vorliegenden Vergleich nicht berücksichtigt. Für die Berechnung der E_N -Werte wurde keine Korrektur der berichteten Messabweichungen e in Bezug auf die unterschiedlichen Einlaufbedingungen vorgenommen.

6.6.4 Gerät #4_Turbine DN150

Laborbedingungen

Die Einlaufbedingungen waren verglichen zwischen Referenzlabor und dem teilnehmenden Laboratorium sehr ähnlich (Tabelle 42). Die Messungen wurden im Referenzlabor bei einer Einlaufmänge von ca. 56DN durchgeführt. Im teilnehmenden Labor entsprach die ungestörte Einlaufmänge in etwa 48DN, jedoch mit einer zusätzlichen Lochplatte im Einlauf.

Tabelle 42: Einlaufmängen und Installationen im Zulauf zu Gerät #4 (Turbine DN150)

Labor Prüfstand	PTB	Labor 1 Prüfstand 3
Ungestörte Einlaufmänge	8,50 m	7,25 m
Installation im Einlauf	Reduzierung	Lochplatte

Geräteigenschaften

Zur Charakterisierung der Gerätesensibilität auf unterschiedliche Einlaufbedingungen wurden mit der Turbine einfache Testmessungen im Pilotlabor durchgeführt (10/2018). Die Charakterisierungen beschränkten auf den Einsatz einer maximalen Störungsvariante im Einlauf durch das Verwenden einer Kombinationsvorstörung aus 50-%-Blende und einem Drall. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Auswirkung der veränderten Zuströmbedingungen auf das Messverhalten der Turbine. Im Vergleich zu Nullmessung ist die Fehlerkurve um bis zu +0,49 % (Einlaufmänge 17DN) bzw. um bis zu +0,30 % (Einlaufmänge 43DN) verschoben (Abbildung 41).

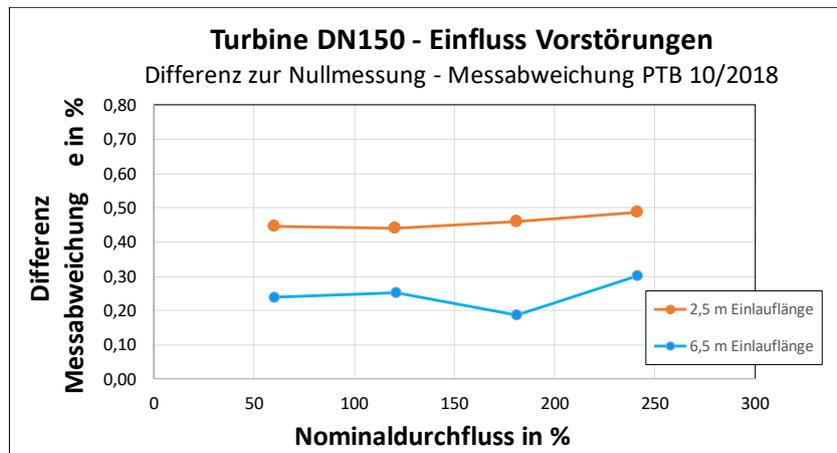


Abbildung 41: Sensitivität Gerät #4 (Turbine DN150) in Bezug auf unterschiedliche Vorstörungen im Einlauf - Differenz der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung ohne Vorstörung

Unsicherheit u_{Einlauf}

Obwohl das Gerät eine deutliche Abhängigkeit auf gestörte Einlaufbedingungen zeigt, wurde für diesen Vergleich keine Unsicherheit u_{Einlauf} für die Turbine angesetzt. Zum einen handelte es sich bei der untersuchten Vorstörung um eine Maximalvariante, ohne mehrere Abstufungen in Version und Einlauflänge. Zum anderen wurde im teilnehmenden Laboratorium neben einer langen Einlaufstrecke zusätzlich mit einer Lochplatte im Zulauf kalibriert (Tabelle 42). Es ist davon auszugehen, dass diese Kombination das Strömungsprofil zur Turbine deutlich unabhängiger von einem möglichen Drall oder anderen Störungen macht. An dieser Stelle wären jedoch noch weitere Untersuchungen notwendig.

Schlussfolgernd wird aus den genannten Gründen die Unsicherheit u_{Einlauf} für die Turbine im vorliegenden Vergleich nicht berücksichtigt. Für die Berechnung der E_N -Werte wurde keine Korrektur der berichteten Messabweichungen e in Bezug auf die unterschiedlichen Einlaufbedingungen vorgenommen.

7 Ergebnisse

7.1 Laborbedingungen

Kalibrierpunkte

Je nach technischer Möglichkeit, wurden die Kalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien mit den zur Verfügung gestellten Transfergeräten durchgeführt. Eine Auflistung der durchgeführten Messungen erfolgt in Tabelle 43, getrennt nach Labor, Prüfstand und Gerät.

Tabelle 43: Durchgeführte Kalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien

	PTB	Labor 1	Labor 2	Labor 3	Labor 4	Labor 5
Gerät #1 Turbine DN15	keine Messung	keine Messung	alle Durchfluss- punkte	keine Messung	alle Durchfluss- punkte	keine Messung
Gerät #2 MID DN25	alle Durchfluss- punkte	<i>Prüfstand 4</i> ausgewählte Punkte	keine Messung	<i>Prüfstand 2</i> alle Durch- flussspunkte	keine Messung	alle Durchfluss- punkte
Gerät #3 Coriolis DN25	alle Durchfluss- punkte	<i>Prüfstand 1</i> <i>Prüfstand 2</i> ausgewählte Punkte	alle Durchfluss- punkte	<i>Prüfstand 1</i> alle Durch- flussspunkte	keine Messung	alle Durchfluss- punkte
Gerät #4 Turbine DN150	alle Durchfluss- punkte	<i>Prüfstand 3</i> ausgewählte Punkte	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung

Fluideigenschaften

Die Laboratorien haben während der Kalibrierungen unterschiedliche Prüfflüssigkeiten verwendet. Eine Auflistung erfolgt in Tabelle 44.

Tabelle 44: Eingesetzte Prüfflüssigkeiten und deren Eigenschaften während der Kalibrierungen in den teilnehmenden Laboratorien. Dichte und Viskosität beziehen sich auf die angegebene Flüssigkeitstemperatur

	PTB	Labor 1	Labor 2	Labor 3	Labor 4	Labor 5
Gerät #1 Turbine DN15			Excol D30 Temperatur: 27,0 °C Dichte: 754,920 kg/m ³ Viskosität: 1,002 mm ² /s		Kalibrieröl Temperatur: 21,2 °C Dichte: 766,0 kg/m ³ Viskosität: 1,064 mm ² /s	
Gerät #2 MID DN25	Wasser Temperatur: 20,0 °C Dichte: 998,395 kg/m ³	Wasser Temperatur: 20,0 °C Dichte: 998,503 kg/m ³		Wasser Temperatur: 24,5 °C Dichte: 997,460 kg/m ³		Wasser Dichte: k.A.
Gerät #3 Coriolis DN25	Wasser Temperatur: 20,0 °C Dichte: 998,395 kg/m ³	Wasser Temperatur: 20,0 °C Dichte: 998,54 kg/m ³	Excol D30 Temperatur: 27,0 °C Dichte: 754,84 kg/m ³ Viskosität: 1,002 mm ² /s	Wasser Temperatur: 27,5 °C Dichte: 996,638 kg/m ³		Wasser Dichte: k.A.
Gerät #4 Turbine DN150	Wasser Temperatur: 20,0 °C Dichte: 998,395 kg/m ³	Wasser Temperatur: 20,0 °C Dichte: 998,503 kg/m ³				

Umgebungstemperatur

Die Maximal- und Minimalwerte der Umgebungstemperaturen während der Kalibrierungen sind in Abbildung 42 bis Abbildung 45 zusammengestellt. Teilweise konnte für die Auswertung nur auf Daten zurückgegriffen werden, die von den Laboratorien als über den Messzeitraum konstant berichtet wurden.

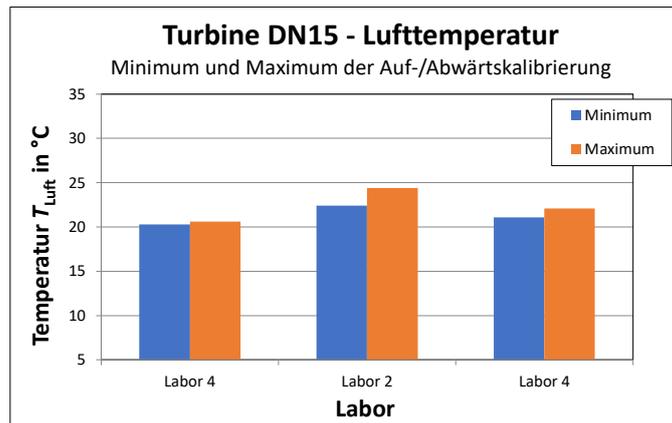


Abbildung 42: Gerät #1 (Turbine DN15) - Maximal- und Minimalwerte der Umgebungstemperatur während der Kalibrierungen

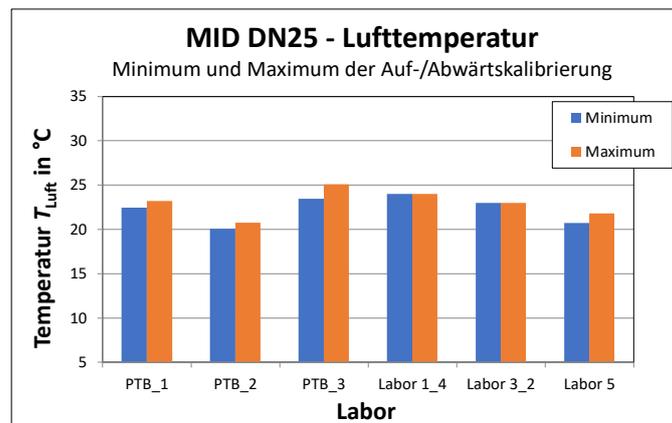


Abbildung 43: Gerät #2 (MID DN25) - Maximal- und Minimalwerte der Umgebungstemperatur während der Kalibrierungen

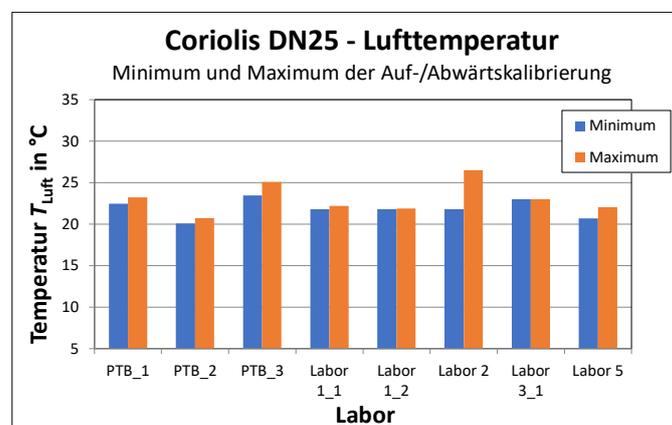


Abbildung 44: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Maximal- und Minimalwerte der Umgebungstemperatur während der Kalibrierungen

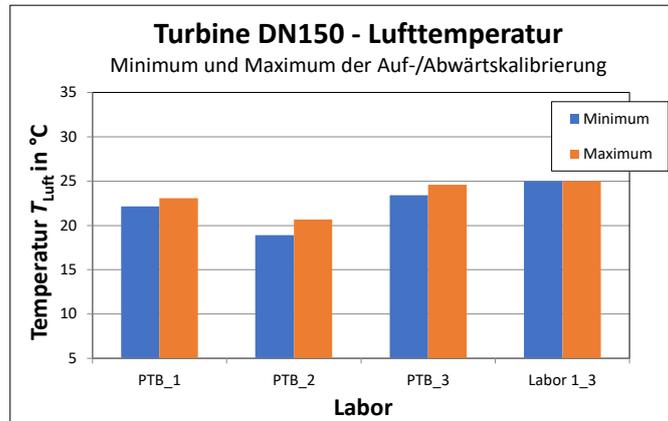


Abbildung 45: Gerät #4 (Turbine DN150) - Maximal- und Minimalwerte der Umgebungstemperatur während der Kalibrierungen

7.2 Kalibrierergebnisse - Gerät #1_Turbine DN15

7.2.1 Zusammenfassung

Laborergebnisse

Tabelle 45: Gerät #1 (Turbine DN15) - Relative Messabweichung x_i (%) der teilnehmenden Laboratorien (Mittelwerte der Messabweichung aus Auf- und Abwärtskalibrierung), Referenzwert y_1 und Unsicherheit $U(y_1)$ mit $k = 2$

Prüfstand	Labor 4	Labor 2		
Datum	30.11.2017	31.01./01.02.2018		
Nominal-durchfluss in m ³ /h	Messabweichung x_i in %	Messabweichung x_i in %	Referenzwert y_1 in %	Erweiterte Unsicherheit mit $k=2$ $U(y_1)$ in %
1,20	-0,033	-0,050	-0,041	0,100
1,12	-0,071	-0,068	-0,070	0,105
1,04	-0,073	-0,067	-0,070	0,108
0,90	-0,076	-0,083	-0,080	0,105
0,88	-0,079	-0,086	-0,082	0,107
0,80	-0,063	-0,108	-0,086	0,106
0,72	-0,070	-0,071	-0,071	0,109
0,64	-0,082	-0,075	-0,078	0,126
0,56	-0,077	-0,050	-0,063	0,126
0,48	-0,068	-0,029	-0,047	0,130
0,40	-0,089	0,041	-0,022	0,187
0,32	-0,088	0,046	-0,019	0,217
0,24	-0,120	0,099	-0,009	0,295
0,16	-0,279	0,312	0,018	0,383
0,08	-0,741	0,031	-0,344	0,371

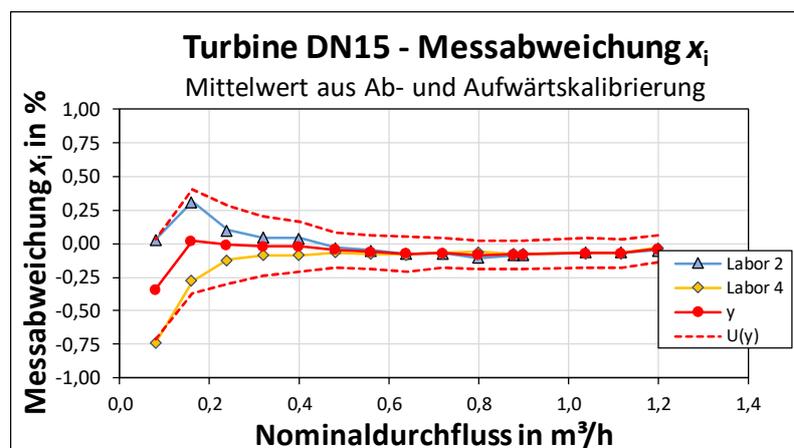


Abbildung 46: Gerät #1 (Turbine DN15) - Relative Messabweichung x_i (%) der teilnehmenden Laboratorien (Mittelwerte aus Ab- und Aufwärtskalibrierung), Referenzwert y_1 und Unsicherheit $U(y_1)$ mit $k = 2$

Referenzwert y_1 , $U(y_1)$ und E_N -Werte

Der gemeinsame Referenzwert y_1 und dessen erweiterte Unsicherheit $U(y_1)$ ist in Abbildung 47 dargestellt. Die abschließenden E_N -Werte zu den Messungen mit der Turbine sind in Tabelle 46 und Abbildung 48 zusammengefasst. Außer bei einem Durchfluss von 0,08 m³/h konnten die teilnehmenden Laboratorien die Vorgabe zum Kriterium $|E_N| \leq 1,00$ erfüllen. Beim Durchfluss von 0,08 m³/h lagen beide Laboratorien im Warnbereich $1,0 < |E_N| \leq 1,20$.

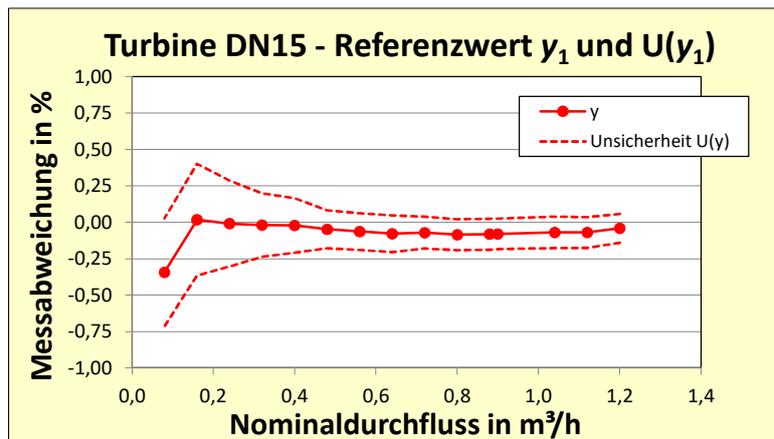


Abbildung 47: Gerät #1 (Turbine DN15) - Referenzwert y_1 und erweiterte Unsicherheit $U(y_1)$ mit $k = 2$

Tabelle 46: Gerät #1 (Turbine DN15) - Zusammenfassung der E_N -Wertberechnung.
* E_N -Werte im Warnbereich

Prüfstand	Labor 4	Labor 2
Datum	30.11.2017	31.01./01.02.2018
Nominaldurchfluss in m ³ /h	E_N -Wert	E_N -Wert
1,20	0,08	-0,08
1,12	-0,02	0,02
1,04	-0,03	0,03
0,90	0,03	-0,03
0,88	0,04	-0,04
0,80	0,21	-0,21
0,72	0,00	0,00
0,64	-0,02	0,02
0,56	-0,10	0,10
0,48	-0,15	0,15
0,40	-0,35	0,35
0,32	-0,31	0,31
0,24	-0,37	0,37
0,16	-0,77	0,77
0,08	-1,04 *	1,04 *

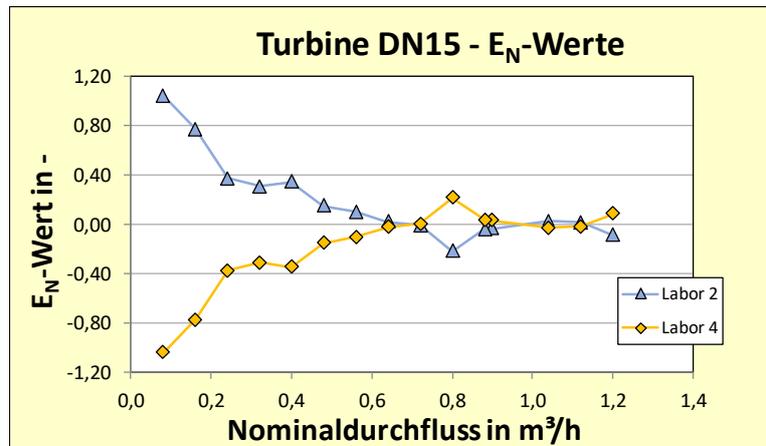


Abbildung 48: Gerät #1 (Turbine DN15) - Ergebnisse der E_N -Wertberechnung

Test auf Tauglichkeit des Transfergerätes mit $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$

Ein wichtiges Kriterium zur Qualität des Vergleiches ist der Test auf Tauglichkeit des Transfergerätes für die angestrebte bzw. nachzuweisende Prüfstandsunsicherheit. Nach [3] und [4], ist ein Gerät dafür geeignet, wenn für das Verhältnis der Unsicherheiten $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}} \leq 2$ gilt. Zusätzlich beinhaltet dieser Wert ein Kriterium für die Stabilität der Einzelmessungen bei den Messungen in den Laboratorien.

Bei Durchflüssen von $\leq 0,40 \text{ m}^3/\text{h}$ konnte das Gerät nicht zur Bestätigung der Prüfstandsunsicherheiten verwendet werden. In diesem Fall lagen für beide Laboratorien die Werte von $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$ bei > 2 (Tabelle 47 und Abbildung 49).

Tabelle 47: Gerät #1 (Turbine DN15) - Zusammenfassung der Auswertung zum Verhältnis $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$ für die Messungen mit dem Transfergerät. ** Werte für $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}} > 2$

Prüfstand	Labor 4	Labor 2
Datum	30.11.2017	31.01./01.02.2018
Nominaldurchfluss in m^3/h	$u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$	$u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$
1,20	1,01	0,98
1,12	1,11	1,10
1,04	1,17	1,14
0,90	1,12	1,07
0,88	1,12	1,13
0,80	1,13	1,11
0,72	1,19	1,17
0,64	1,51	1,45
0,56	1,48	1,47
0,48	1,62	1,49
0,40	2,49 **	2,40 **
0,32	2,96 **	2,86 **
0,24	4,08 **	4,02 **
0,16	5,33 **	5,32 **
0,08	5,23 **	5,07 **

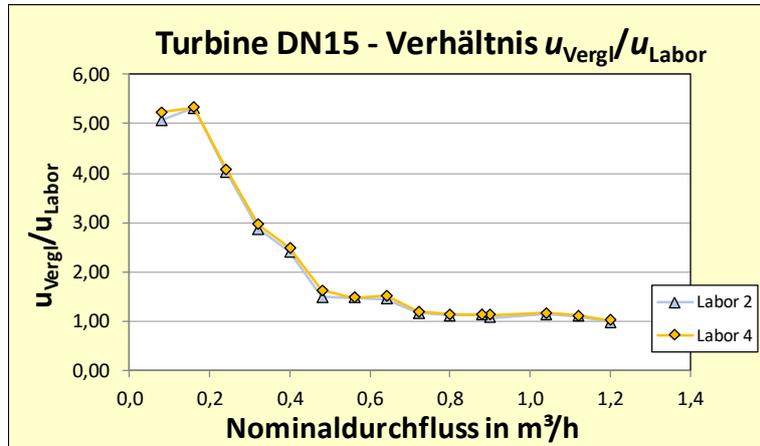


Abbildung 49: Gerät #1 (Turbine DN15) - Ergebnisse zum Verhältnis $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$ für die teilnehmenden Laboratorien

7.2.2 Einzelergebnisse der Laboratorien

Labor 2

Die Vergleichsmessungen konnten für alle Durchflüsse $\geq 0,48 \text{ m}^3/\text{h}$ die in Tabelle 48 angegebenen Prüfstandsunsicherheiten für eine Volumenkalibrierung bestätigen. Bei Durchflüssen von $\leq 0,40 \text{ m}^3/\text{h}$ waren dagegen die Werte für $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$ zu hoch.

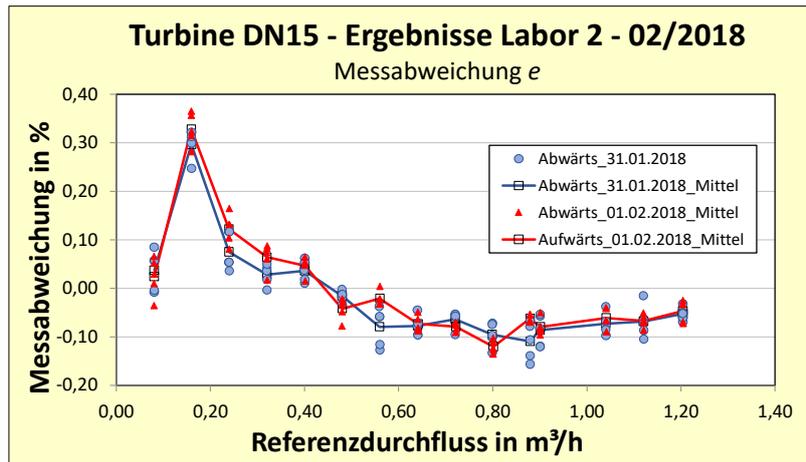


Abbildung 50: Kalibrierergebnisse Labor 2 - Messabweichung e

Tabelle 48: Labor 2 - Ausgangsdaten für die Berechnung der E_N -Werte sowie von $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$

Nominal-durchfluss	u_{Labor}	u_{TS}	Messab- weichung	Standard- abweichung	Anzahl
			x_i	x_i	x_i
in m^3/h	in %	in %	in %	in %	in %
1,20	0,050	0,049	-0,050	0,018	10
1,12	0,050	0,054	-0,068	0,024	10
1,04	0,050	0,057	-0,067	0,021	10
0,90	0,050	0,053	-0,083	0,025	10
0,88	0,050	0,056	-0,086	0,036	10
0,80	0,050	0,055	-0,108	0,023	10
0,72	0,050	0,058	-0,071	0,015	10
0,64	0,050	0,072	-0,075	0,018	10
0,56	0,050	0,072	-0,050	0,042	10
0,48	0,050	0,074	-0,029	0,022	10
0,40	0,050	0,120	0,041	0,020	10
0,32	0,050	0,143	0,046	0,030	10
0,24	0,050	0,200	0,099	0,041	10
0,16	0,050	0,266	0,312	0,034	10
0,08	0,050	0,253	0,031	0,039	10

Tabelle 49: Labor 2 - Berechnung der Bewertungskriterien (E_N -Wert und u_{Vergl}/u_{Labor}) und Entscheidung für die Prüfstandsunsicherheit. * E_N -Werte im Warnbereich, ** Werte für $u_{Vergl}/u_{Labor} > 2$

Nominal- durchfluss	$u(x_i)$	y_1	$u(y_1)$	$d_{i,y1}$	$U(d_{i,y1})$ $k = 2$ E_N -Wert	E_N -Wert $\leq 1,00$ bzw. $\leq 1,20$	$u_{Vergl}/$ u_{Lab} $\leq 2,00$	Entscheidung zur Prüfstands- unsicherheit
in m ³ /h	in %	in %	in %	in %	in %			
1,20	0,070	-0,041	0,050	-0,008	0,098	-0,08	0,98	bestätigt
1,12	0,074	-0,070	0,053	0,002	0,105	0,02	1,10	bestätigt
1,04	0,076	-0,070	0,054	0,003	0,106	0,03	1,14	bestätigt
0,90	0,073	-0,080	0,052	-0,003	0,102	-0,03	1,07	bestätigt
0,88	0,076	-0,082	0,053	-0,004	0,107	-0,04	1,13	bestätigt
0,80	0,075	-0,086	0,053	-0,022	0,105	-0,21	1,11	bestätigt
0,72	0,077	-0,071	0,055	0,000	0,108	0,00	1,17	bestätigt
0,64	0,088	-0,078	0,063	0,003	0,123	0,02	1,45	bestätigt
0,56	0,089	-0,063	0,063	0,013	0,126	0,10	1,47	bestätigt
0,48	0,090	-0,047	0,065	0,018	0,123	0,15	1,49	bestätigt
0,40	0,130	-0,022	0,093	0,063	0,181	0,35	2,40 **	unschlüssig
0,32	0,152	-0,019	0,109	0,065	0,211	0,31	2,86 **	unschlüssig
0,24	0,207	-0,009	0,147	0,108	0,290	0,37	4,02 **	unschlüssig
0,16	0,270	0,018	0,192	0,295	0,382	0,77	5,32 **	unschlüssig
0,08	0,258	-0,344	0,185	0,374	0,360	1,04 *	5,07 **	unschlüssig

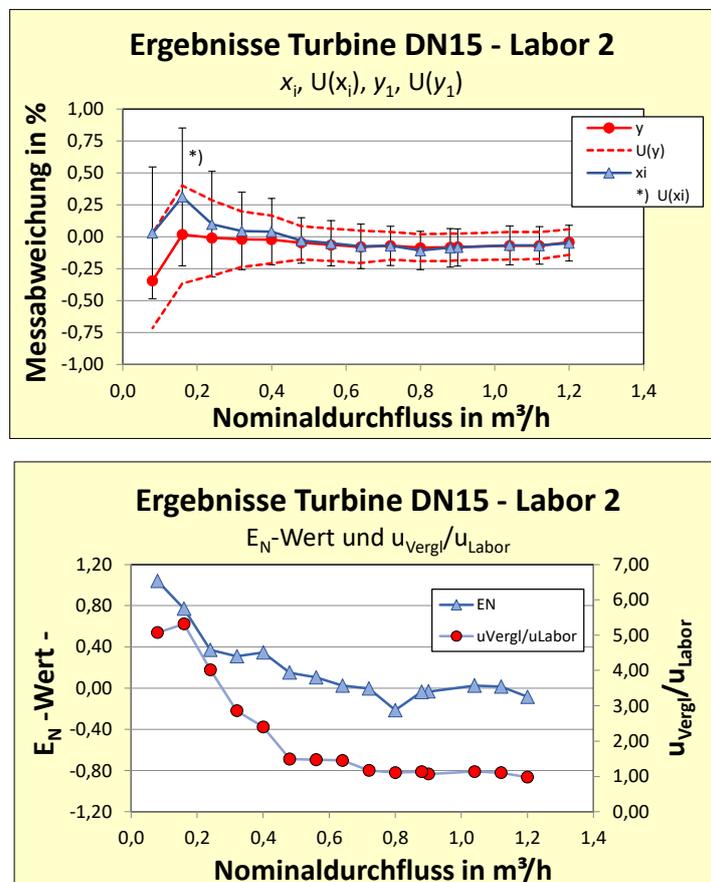


Abbildung 51: Gerät #1 (Turbine DN15) - Ergebnisse der Vergleichsmessungen für Labor 2

Labor 4

Die Vergleichsmessungen konnten für alle Durchflüsse $\geq 0,48 \text{ m}^3/\text{h}$ die in Tabelle 50 angegebenen Prüfstandsunsicherheiten für eine Volumenkalibrierung bestätigen. Bei Durchflüssen von $\leq 0,40 \text{ m}^3/\text{h}$ waren dagegen die Werte für $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$ zu hoch.

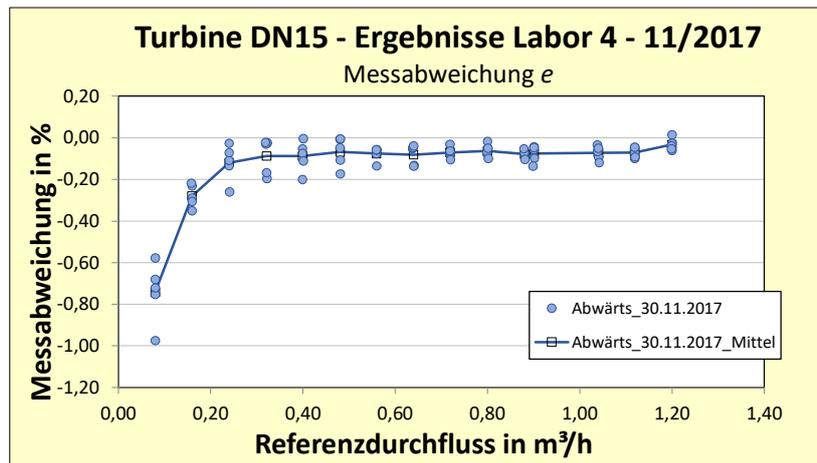


Abbildung 52: Kalibrierergebnisse Labor 4 - Messabweichung e

Tabelle 50: Labor 4 - Ausgangsdaten für die Berechnung der E_N -Werte sowie von $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$

Nominal-durchfluss	u_{Labor}	u_{TS}	Messabweichung	Standardabweichung	Anzahl
			x_i	x_i	x_i
in m³/h	in %	in %	in %	in %	in %
1,20	0,050	0,049	-0,033	0,030	5
1,12	0,050	0,054	-0,071	0,025	5
1,04	0,050	0,057	-0,073	0,034	5
0,90	0,050	0,053	-0,076	0,040	5
0,88	0,050	0,056	-0,079	0,019	5
0,80	0,050	0,055	-0,063	0,031	5
0,72	0,050	0,058	-0,070	0,027	5
0,64	0,050	0,072	-0,082	0,049	5
0,56	0,050	0,072	-0,077	0,034	5
0,48	0,050	0,074	-0,068	0,072	5
0,40	0,050	0,120	-0,089	0,074	5
0,32	0,050	0,143	-0,088	0,086	5
0,24	0,050	0,200	-0,120	0,088	5
0,16	0,050	0,266	-0,279	0,055	5
0,08	0,050	0,253	-0,741	0,146	5

Tabelle 51: Labor 4 - Berechnung der Bewertungskriterien (E_N -Wert und u_{Vergl}/u_{Lab}) und Entscheidung für die Prüfstandsunsicherheit. * E_N -Werte im Warnbereich, ** Werte für $u_{Vergl}/u_{Labor} > 2$

Nominal- durchfluss	$u(x_i)$	y_1	$u(y_1)$	$d_{i,y1}$	$U(d_{i,y1})$ $k = 2$ E_N -Wert	E_N -Wert $\leq 1,00$ bzw. $\leq 1,20$	$u_{Vergl}/$ u_{Lab} $\leq 2,00$	Entscheidung zur Prüfstands- unsicherheit
in m ³ /h	in %	in %	in %	in %	in %			
1,20	0,071	-0,041	0,050	0,009	0,1012	0,08	1,01	bestätigt
1,12	0,075	-0,070	0,053	-0,002	0,1059	-0,02	1,11	bestätigt
1,04	0,077	-0,070	0,054	-0,003	0,1097	-0,03	1,17	bestätigt
0,90	0,075	-0,080	0,052	0,004	0,1072	0,03	1,12	bestätigt
0,88	0,075	-0,082	0,053	0,004	0,1061	0,04	1,12	bestätigt
0,80	0,075	-0,086	0,053	0,023	0,1074	0,21	1,13	bestätigt
0,72	0,078	-0,071	0,055	0,000	0,1104	0,00	1,19	bestätigt
0,64	0,091	-0,078	0,063	-0,003	0,1299	-0,02	1,51	bestätigt
0,56	0,089	-0,063	0,063	-0,013	0,1265	-0,10	1,48	bestätigt
0,48	0,095	-0,047	0,065	-0,021	0,1382	-0,15	1,62	bestätigt
0,40	0,134	-0,022	0,093	-0,067	0,1925	-0,35	2,49 **	unschlüssig
0,32	0,156	-0,019	0,109	-0,069	0,2239	-0,31	2,96 **	unschlüssig
0,24	0,210	-0,009	0,147	-0,111	0,2997	-0,37	4,08 **	unschlüssig
0,16	0,271	0,018	0,192	-0,297	0,3844	-0,77	5,33 **	unschlüssig
0,08	0,266	-0,344	0,185	-0,397	0,3820	-1,04 *	5,23 **	unschlüssig

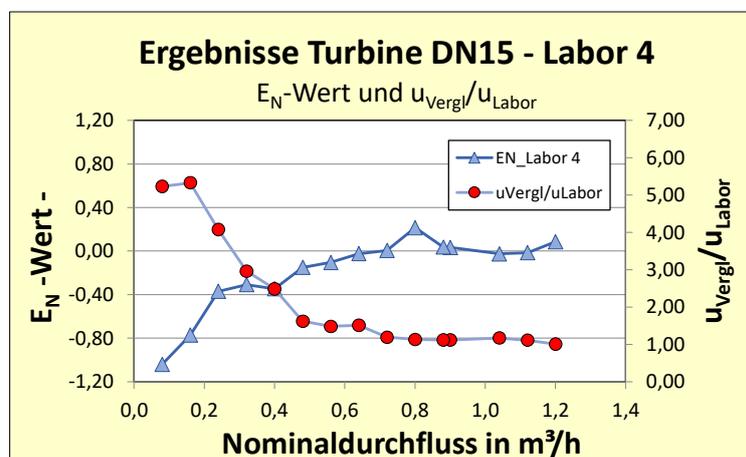
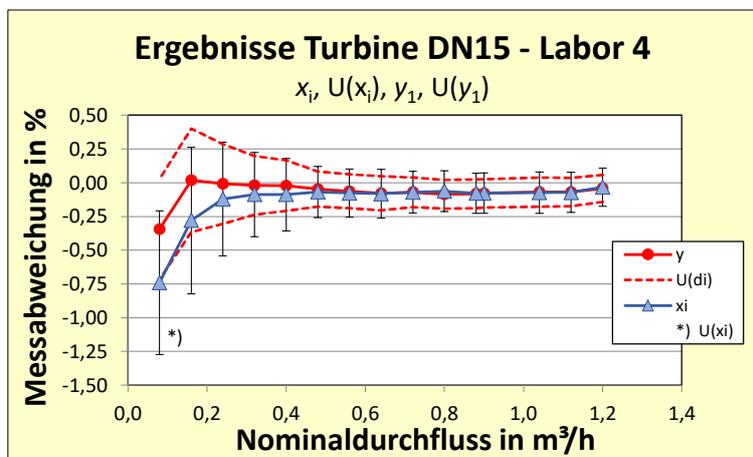


Abbildung 53: Gerät #1 (Turbine DN15) - Ergebnisse der Vergleichsmessungen für Labor 4

7.3 Kalibrierergebnisse - Gerät #2_MID DN25

7.3.1 Zusammenfassung

Laborergebnisse

Tabelle 52: Gerät #2 (MID DN25) - Relative Messabweichung x_i (%) der teilnehmenden Laboratorien - Mittelwerte der Messabweichung aus Auf- und Abwärtskalibrierung

Labor	PTB_2		Labor 1	Labor 3	Labor 5
Prüfstand			Prüfstand 4	Prüfstand 2	
Datum	20./21.02.2018		06./07.04.2018	12./13.07.2018	08./09.05.2018
Nominaldurchfluss in m³/h	Messabweichung x_i in % = Referenzwert y_2 in %	$U(y_2)$ mit $k = 2$ in %	Messabweichung x_i in %	Messabweichung x_i in %	Messabweichung x_i in %
9,0	-0,129	0,112	-0,141	-0,150	-0,107
8,1	-0,126	0,112		-0,156	-0,111
7,2	-0,120	0,108	-0,139	-0,173	-0,116
6,3	-0,128	0,108		-0,157	-0,113
5,4	-0,116	0,106		-0,161	-0,111
4,5	-0,101	0,106	-0,145	-0,153	-0,104
3,6	-0,113	0,110		-0,144	-0,096
2,7	-0,081	0,108	-0,120	-0,133	-0,088
1,8	-0,057	0,114		-0,112	-0,046
0,9	-0,059	0,160	0,011	0,014	0,127

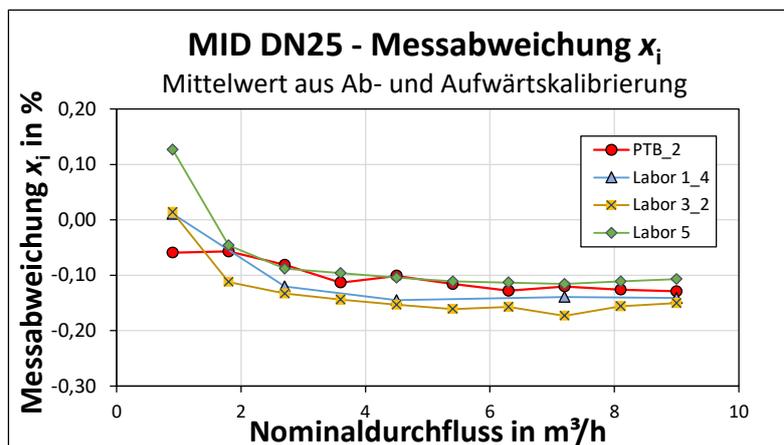


Abbildung 54: Gerät #2 (MID DN25) - Relative Messabweichung x_i (%) der teilnehmenden Labore - Mittelwerte aus Ab- und Aufwärtskalibrierung

Referenzwert y_2 , $U(y_2)$ und E_N -Werte

Der Referenzwert y_2 und dessen erweiterte Unsicherheit ist in Abbildung 55 dargestellt. Die abschließenden E_N -Werte sind in Tabelle 53 und Abbildung 56 zusammengefasst. Alle teilnehmenden Laboratorien erfüllen die Vorgaben zum Kriterium $|E_N| \leq 1,0$.

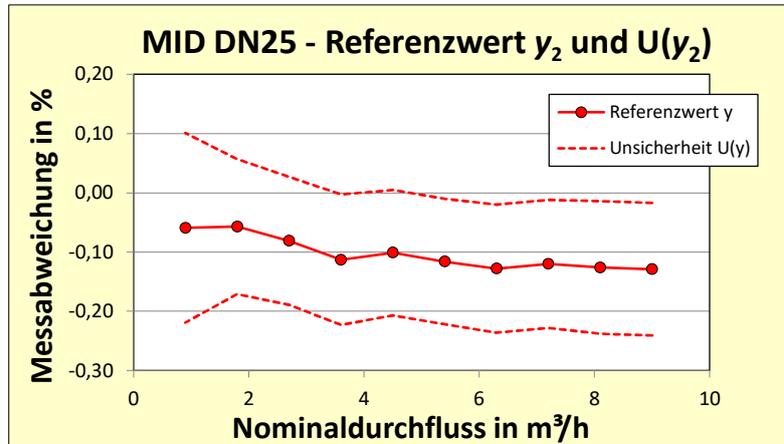


Abbildung 55: Gerät #2 (MID DN25) - Referenzwert y_2 (= PTB_2 Messung am 20./21.02.2018) als Mittelwert aus Ab- und Abwärtskalibrierung und erweiterte Unsicherheit $U(y_2)$ mit $k = 2$

Tabelle 53: Gerät #2 (MID DN25) - Zusammenfassung der E_N -Wertberechnung

Labor	Labor 1	Labor 3	Labor 5
Prüfstand	Prüfstand 4	Prüfstand 2	
Datum	06./07.04.2018	12./13.07.2018	08./09.05.2018
Nominaldurchfluss in m³/h	E_N -Wert	E_N -Wert	E_N -Wert
9,0	0,07	0,11	0,13
8,1		0,16	0,09
7,2	0,11	0,29	0,02
6,3		0,16	0,09
5,4		0,25	0,03
4,5	0,27	0,29	0,02
3,6		0,17	0,10
2,7	0,23	0,29	0,04
1,8		0,29	0,06
0,9	0,31	0,31	0,81

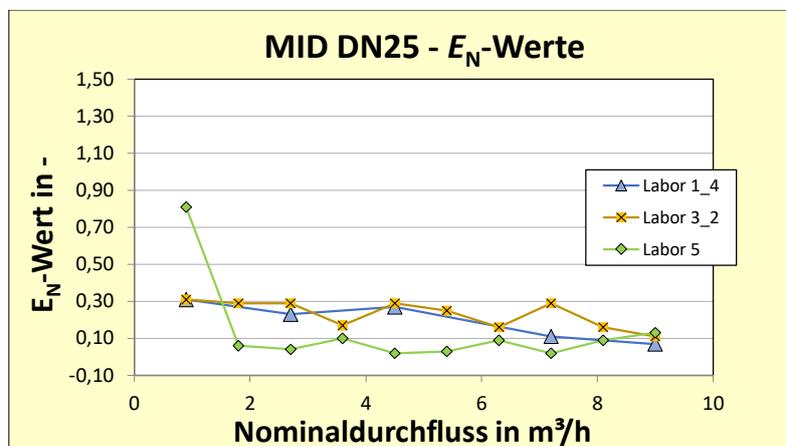


Abbildung 56: Gerät #2 (MID DN25) - Ergebnisse der E_N -Wertberechnung

Test auf Tauglichkeit des Transfergerätes mit $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$

Bis auf einen Wert, kann die Tauglichkeit des Transfergerätes für alle Laboratorien und deren Unsicherheiten bestätigt werden (Tabelle 54 und Abbildung 57).

Tabelle 54: Gerät #2 (MID DN25) - Zusammenfassung der Auswertung zum Verhältnis $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$ für die Messungen mit dem Transfergerät. ** Werte für $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}} > 2$

Labor	Labor 1	Labor 3	Labor 5
Prüfstand	Prüfstand 4	Prüfstand 2	
Datum	06./07.04.2018	12./13.07.2018	08./09.05.2018
Nominaldurchfluss in m³/h	$u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$	$u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$	$u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$
9,0	1,58	1,10	1,37
8,1		1,10	1,37
7,2	1,51	1,06	1,32
6,3		1,05	1,31
5,4		1,03	1,29
4,5	1,48	1,03	1,29
3,6		1,09	1,36
2,7	1,51	1,06	1,32
1,8		1,16	1,41
0,9	2,07 **	1,46	1,81

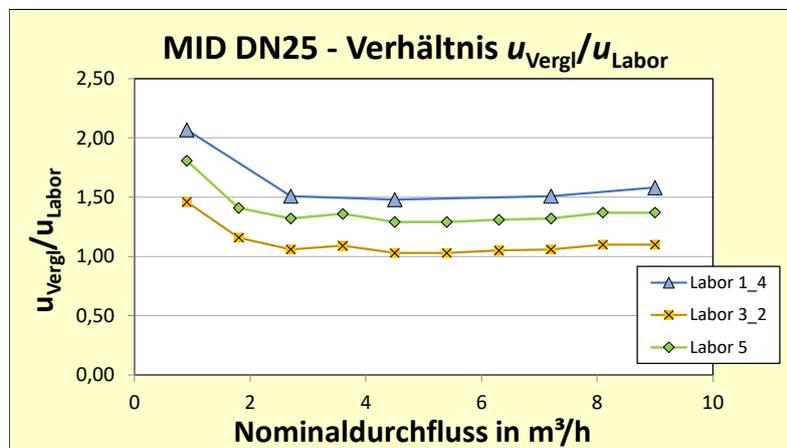


Abbildung 57: Gerät #2 (MID DN25) - Ergebnisse zum Verhältnis $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$ für die teilnehmenden Laboratorien

7.3.2 Einzelergebnisse der Laboratorien

Labor 1 (Prüfstand 4)

Außer für den Durchfluss bei 0,9 m³/h, konnten die Vergleichsmessungen alle die in Tabelle 55 angegebenen Prüfstandsunsicherheiten für eine Volumenkalibrierung bestätigen. Für den Durchfluss von 0,9 t/h war die Unsicherheit des Transfergerätes während der Messungen zu hoch ($u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}} = 2,07$).

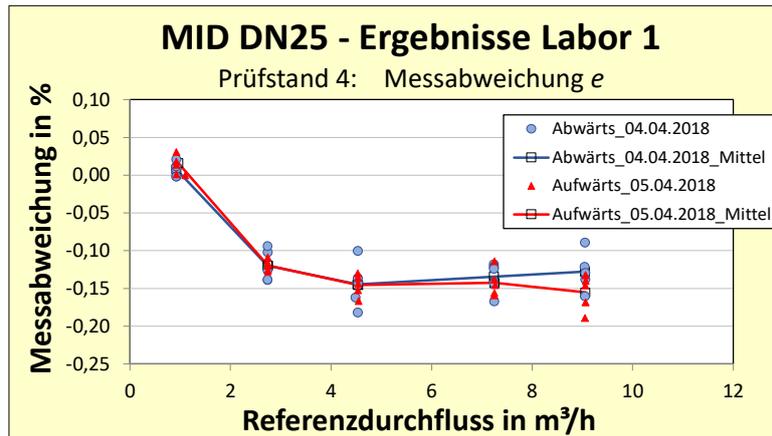


Abbildung 58: Kalibrierergebnisse Labor 1 (Prüfstand 4) - Messabweichung e

Tabelle 55: Labor 1 (Prüfstand 4) - Ausgangsdaten für die Berechnung der E_N -Werte sowie von $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$

Nominal- durch- fluss	u_{Labor}		u_{TS}	Messabweichung		Standardabw.		Anzahl	
	Labor 1	PTB		x_i	y_2	x_i	y_2	x_i	y_2
	in m ³ /h	in %	in %	in %	in %	in %	in %	Labor 1	PTB
9,0	0,035	0,010	0,054	-0,141	-0,129	0,028	0,015	10	10
8,1									
7,2	0,035	0,010	0,053	-0,139	-0,12	0,019	0,018	10	10
6,3									
5,4									
4,5	0,035	0,010	0,051	-0,145	-0,101	0,023	0,023	10	10
3,6	0,035	0,010	0,054						
2,7	0,035	0,010	0,053	-0,120	-0,081	0,015	0,021	10	10
1,8									
0,9	0,035	0,010	0,072	0,011	-0,059	0,011	0,101	9	9

Tabelle 56: Labor 1 (Prüfstand 4) - Berechnung der Bewertungskriterien (E_N -Wert und $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$) und Entscheidung für die Prüfstandsunsicherheit. ** Werte für $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}} > 2$

Nominal- durch- fluss	$u(x_i)$	$u(y_2)$	d_{i,y_2}	$u(d_{i,y_2})$	$U(d_{i,y_2})$ $k = 2$	E_N -Wert $\leq 1,00$ bzw. $\leq 1,20$	$u_{\text{Vergl}}/$ u_{Labor} $\leq 2,00$	Entscheidung zur Prüfstands- unsicherheit
	Labor 1	PTB				Labor 1	Labor 1	
in m ³ /h	in %	in %	in %	in %	in %			
9,0	0,065	0,056	-0,012	0,086	0,172	0,07	1,58	bestätigt
8,1								
7,2	0,063	0,054	-0,019	0,083	0,166	0,11	1,51	bestätigt
6,3								
5,4								
4,5	0,062	0,053	-0,044	0,082	0,164	0,27	1,48	bestätigt
3,6								
2,7	0,063	0,054	-0,039	0,083	0,166	0,23	1,51	bestätigt
1,8								
0,9	0,080	0,080	0,070	0,113	0,226	0,31	2,07 **	unschlüssig

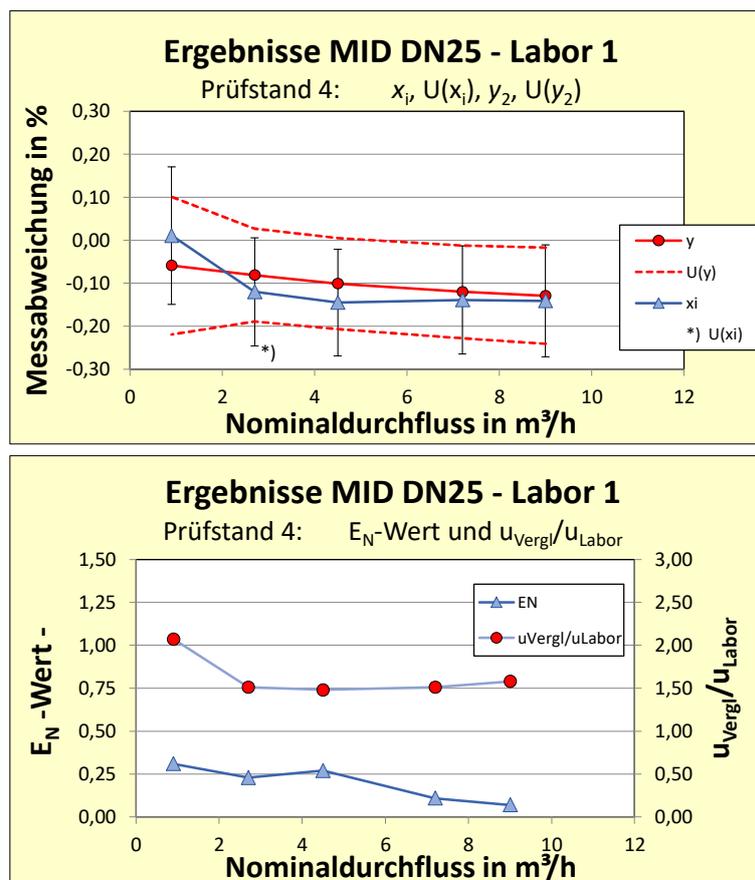


Abbildung 59: Gerät #2 (MID DN25) - Ergebnisse der Vergleichsmessungen für Labor 1

Labor 5

Über den gesamten untersuchten Durchflussbereich konnten die Vergleichsmessungen alle die in Tabelle 57 angegebenen Prüfstandsunsicherheiten für eine Volumenkalibrierung bestätigen.

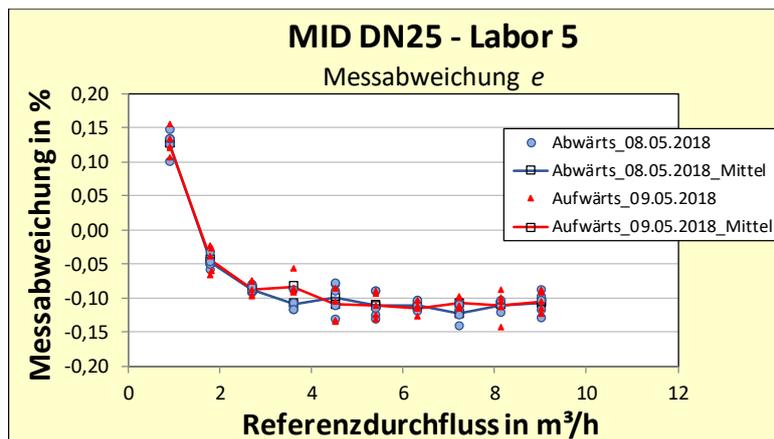


Abbildung 60: Kalibrierergebnisse Labor 5 - Messabweichung e

Tabelle 57: Labor 5 - Ausgangsdaten für die Berechnung der E_N -Werte sowie von $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$

Nominal- durch- fluss	u_{Labor}		u_{TS}	Messabweichung		Standardabw.		Anzahl	
	Labor 5	PTB		x_i	y_2	x_i	y_2	x_i	y_2
				Labor 5	PTB	Labor 5	PTB	Labor 5	PTB
in m³/h	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %		
9,0	0,040	0,010	0,054	-0,107	-0,129	0,015	0,015	10	10
8,1	0,040	0,010	0,055	-0,111	-0,126	0,014	0,008	10	10
7,2	0,040	0,010	0,053	-0,116	-0,12	0,012	0,018	10	10
6,3	0,040	0,010	0,052	-0,113	-0,128	0,008	0,026	10	9
5,4	0,040	0,010	0,051	-0,111	-0,116	0,018	0,015	10	10
4,5	0,040	0,010	0,051	-0,104	-0,101	0,023	0,023	10	10
3,6	0,040	0,010	0,054	-0,096	-0,113	0,018	0,012	10	9
2,7	0,040	0,010	0,053	-0,088	-0,081	0,008	0,021	10	10
1,8	0,040	0,010	0,056	-0,046	-0,057	0,014	0,009	10	10
0,9	0,040	0,010	0,072	0,127	-0,059	0,017	0,101	10	9

Tabelle 58: Labor 5 - Berechnung der Bewertungskriterien (E_N -Wert und $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Lab}}$) und Entscheidung für die Prüfstandsunsicherheit

Nominal- durch- fluss	$u(x_i)$	$u(y_2)$	d_{i,y_2}	$u(d_{i,y_2})$	$U(d_{i,y_2})$ $k = 2$	E_N -Wert $\leq 1,00$ bzw. $\leq 1,20$	$u_{\text{Vergl}}/$ u_{Lab} $\leq 2,00$	Entscheidung zur Prüfstands- unsicherheit
	Labor 5	PTB				Labor 5	Labor 5	
in m ³ /h	in %	in %	in %	in %	in %			
9,0	0,068	0,056	0,022	0,088	0,176	0,13	1,37	bestätigt
8,1	0,068	0,056	0,015	0,088	0,176	0,09	1,37	bestätigt
7,2	0,066	0,054	0,004	0,085	0,170	0,02	1,32	bestätigt
6,3	0,066	0,054	0,015	0,085	0,170	0,09	1,31	bestätigt
5,4	0,065	0,053	0,005	0,084	0,168	0,03	1,29	bestätigt
4,5	0,065	0,053	-0,003	0,084	0,168	0,02	1,29	bestätigt
3,6	0,068	0,055	0,017	0,087	0,174	0,10	1,36	bestätigt
2,7	0,066	0,054	-0,007	0,085	0,170	0,04	1,32	bestätigt
1,8	0,069	0,057	0,011	0,089	0,178	0,06	1,41	bestätigt
0,9	0,083	0,080	0,186	0,115	0,230	0,81	1,81	bestätigt

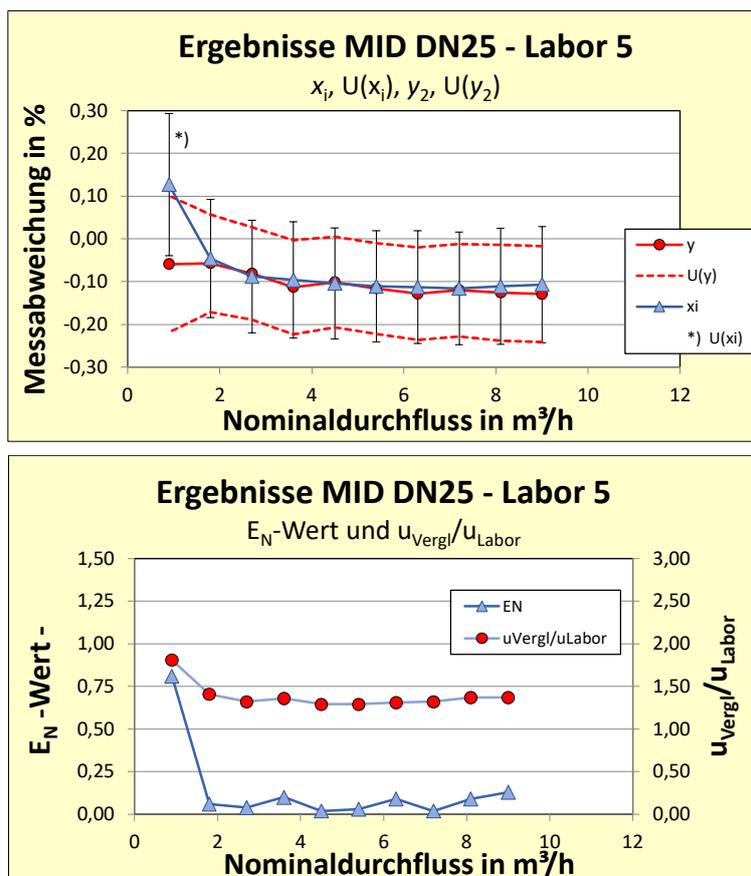


Abbildung 61: Gerät #2 (MID DN25) - Ergebnisse der Vergleichsmessungen für Labor 5

Labor 3 (Prüfstand 2)

Über den gesamten untersuchten Durchflussbereich konnten die Vergleichsmessungen alle die in Tabelle 59 angegebenen Prüfstandsunsicherheiten für eine Volumenkalibrierung bestätigen.

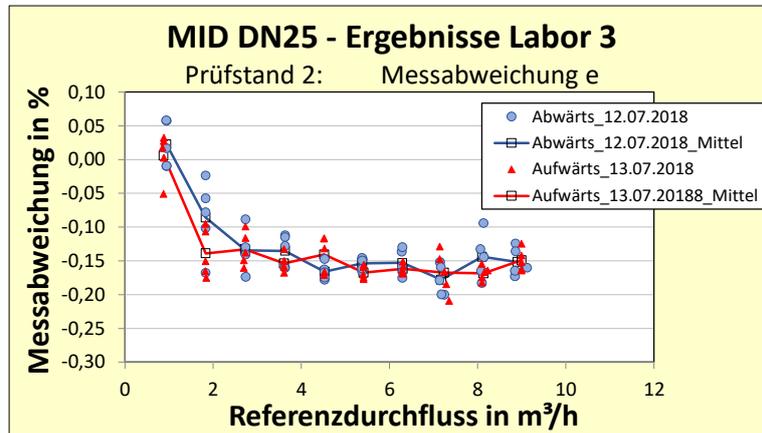


Abbildung 62: Kalibrierergebnisse Prüfstand Labor 3 - berichtete Messabweichung e

Tabelle 59: Labor 3 (Prüfstand 2) - Ausgangsdaten für die Berechnung der E_N -Werte sowie von u_{Vergl}/u_{Labor}

Nominal- durch- fluss	u_{Labor}		u_{TS}	Messabweichung		Standardabw.		Anzahl	
	Labor 3	PTB		Labor 3	PTB	Labor 3	PTB	Labor 3	PTB
in m³/h	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %		
9,0	0,050	0,010	0,054	-0,150	-0,129	0,018	0,015	10	10
8,1	0,050	0,010	0,055	-0,156	-0,126	0,027	0,008	10	10
7,2	0,050	0,010	0,053	-0,173	-0,12	0,026	0,018	10	10
6,3	0,050	0,010	0,052	-0,157	-0,128	0,015	0,026	10	9
5,4	0,050	0,010	0,051	-0,161	-0,116	0,011	0,015	10	10
4,5	0,050	0,010	0,051	-0,153	-0,101	0,023	0,023	10	10
3,6	0,050	0,010	0,054	-0,144	-0,113	0,021	0,012	10	9
2,7	0,050	0,010	0,053	-0,133	-0,081	0,026	0,021	10	10
1,8	0,050	0,010	0,056	-0,112	-0,057	0,051	0,009	10	10
0,9	0,050	0,010	0,072	0,014	-0,059	0,033	0,101	10	9

Tabelle 60: Labor 3 (Prüfstand 2) - Berechnung der Bewertungskriterien (E_N -Wert und $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Lab}}$) und Entscheidung für die Prüfstandsunsicherheit

Nominal- durch- fluss	$u(x_i)$	$u(y_2)$	d_{i,y_2}	$u(d_{i,y_2})$	$U(d_{i,y_2})$ $k = 2$	E_N -Wert $\leq 1,00$ bzw. $\leq 1,20$	$u_{\text{Vergl}}/$ u_{Lab} $\leq 2,00$	Entscheidung zur Prüfstands- unsicherheit
	Labor 3	PTB				Labor 3	Labor 3	
in m ³ /h	in %	in %	in %	in %	in %			
9,0	0,074	0,056	-0,021	0,093	0,186	0,11	1,10	bestätigt
8,1	0,074	0,056	-0,030	0,093	0,186	0,16	1,10	bestätigt
7,2	0,073	0,054	-0,053	0,091	0,182	0,29	1,06	bestätigt
6,3	0,073	0,054	-0,029	0,091	0,182	0,16	1,05	bestätigt
5,4	0,072	0,053	-0,045	0,089	0,178	0,25	1,03	bestätigt
4,5	0,072	0,053	-0,052	0,089	0,178	0,29	1,03	bestätigt
3,6	0,074	0,055	-0,031	0,092	0,184	0,17	1,09	bestätigt
2,7	0,073	0,054	-0,052	0,091	0,182	0,29	1,06	bestätigt
1,8	0,077	0,057	-0,055	0,096	0,192	0,29	1,16	bestätigt
0,9	0,088	0,080	0,073	0,119	0,238	0,31	1,46	bestätigt

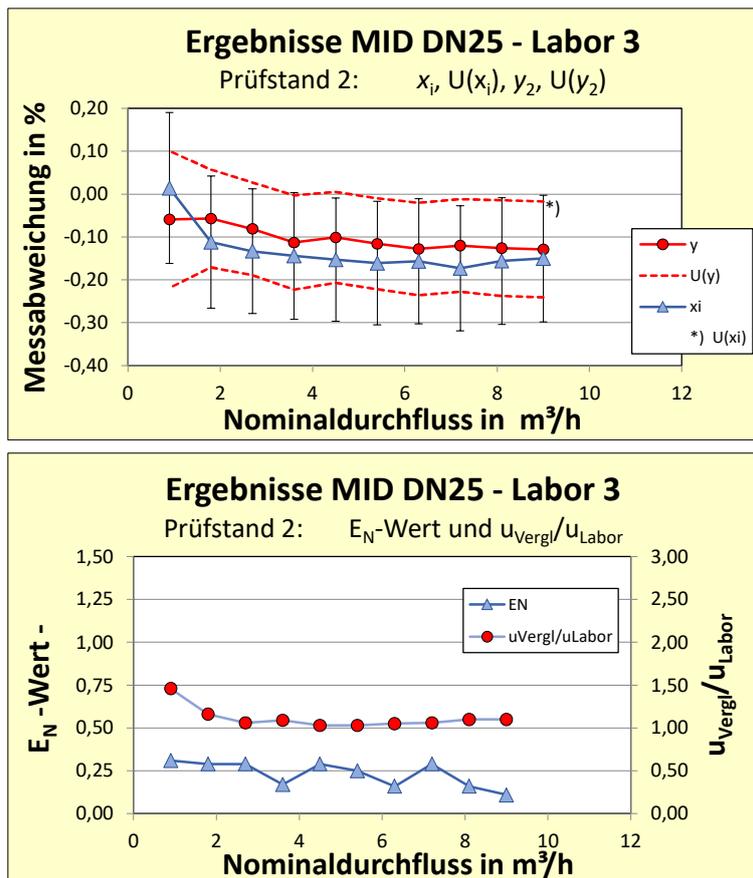


Abbildung 63: Gerät #2 (MID DN25) - Ergebnisse der Vergleichsmessungen für Labor 3 (Prüfstand 2)

7.4 Kalibrierergebnisse - Gerät #3_Coriolis DN25

7.4.1 Zusammenfassung

Laborergebnisse

Tabelle 61: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Relative Messabweichung x_i (%) der teilnehmenden Laboratorien - Mittelwerte der korrigierten Messabweichung aus Auf- und Abwärtskalibrierung

Labor	PTB_2		Labore 1	Labor 1	Labor 2	Labor 3	Labor 5
Prüfstand			Prüfstand 1	Prüfstand 2		Prüfstand 1	
Datum	20./21.02. 2018		04./05.04. 2018	06./07.04. 2018	05./06.02. 2018	12./13.07. 2018	03./04.05. 2018
Nominal- durchfluss in t/h	Messab- weichung x_i in % = Referenz- wert y_2 in %	$U(y_2)$ mit $k = 2$ in %	Messab- weichung x_i in %				
9,0	-0,014	0,028	-0,030		0,016	-0,017	-0,010
8,1	-0,020	0,028			0,004	-0,013	-0,010
7,2	-0,018	0,028	-0,030	-0,035	-0,001	-0,008	-0,011
6,3	-0,019	0,028			-0,012	-0,005	-0,007
5,4	-0,017	0,030			0,015	-0,014	-0,008
4,5	-0,011	0,032	-0,033	-0,038	0,024	-0,043	-0,015
3,6	-0,021	0,034			0,021	-0,050	-0,016
2,7	-0,010	0,040	-0,047	-0,054	0,008	-0,060	-0,029
1,8	0,005	0,048	-0,044	-0,050	0,017	-0,068	-0,025
0,9	0,002	0,054	0,005		0,049	-0,078	0,001

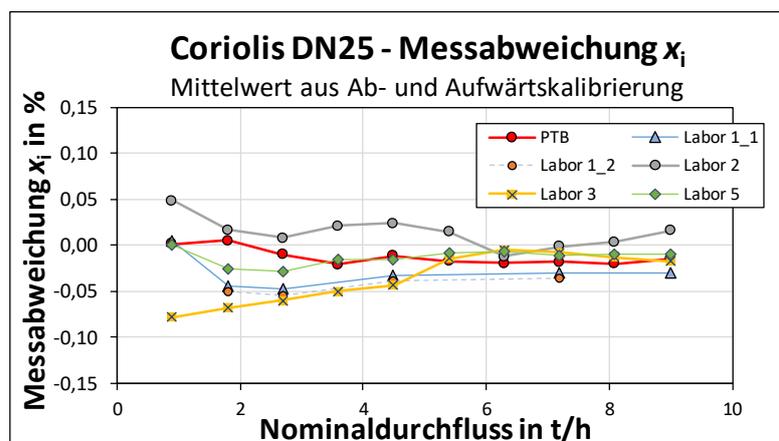


Abbildung 64: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Relative Messabweichung x_i (%) der teilnehmenden Labore - Mittelwerte der korrigierten Messabweichung aus Ab- und Aufwärtskalibrierung

Referenzwert y_2 , $U(y_2)$ und E_N -Werte

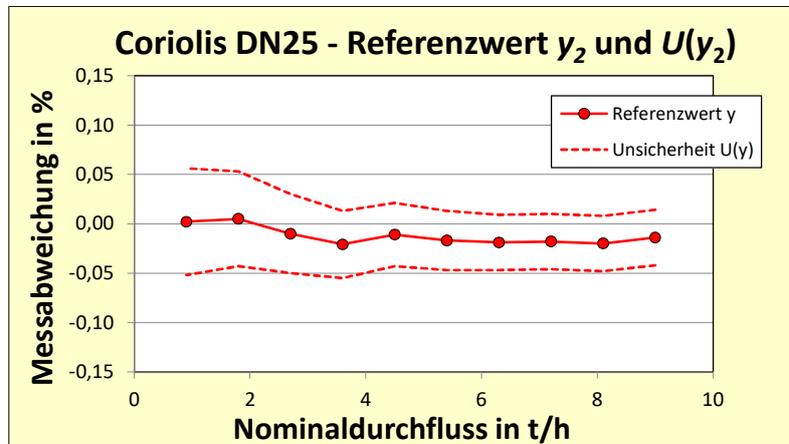


Abbildung 65: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Referenzwert y_2 (= PTB_2 - Messung am 20./21.02.2018) als Mittelwert aus Ab- und Abwärtskalibrierung und erweiterte Unsicherheit $U(y_2)$ mit $k = 2$

Die abschließenden E_N -Werte zu den Messungen mit dem Coriolis sind in Tabelle 62 und Abbildung 66 dargestellt. Alle teilnehmenden Laboratorien konnten die Vorgaben zu $|E_N|$ mit $\leq 1,00$ erfüllen.

Tabelle 62: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Zusammenfassung der E_N -Wertberechnung für die teilnehmenden Laboratorien

Labor	Labor 1	Labor 1	Labor 2	Labor 3	Labor 5
Prüfstand	Prüfstand 1	Prüfstand 2		Prüfstand 1	
Datum	04./05.04.2018	06./07.04.2018	05./06.02.2018	12./13.07.2018	03./04.05.2018
Nominaldurchfluss in t/h	E_N -Wert				
9,0	0,38		0,48	0,04	0,07
8,1			0,39	0,09	0,17
7,2	0,29	0,40	0,26	0,13	0,12
6,3			0,11	0,18	0,20
5,4			0,50	0,04	0,15
4,5	0,48	0,59	0,53	0,40	0,06
3,6			0,62	0,35	0,07
2,7	0,64	0,76	0,24	0,57	0,26
1,8	0,72	0,81	0,15	0,76	0,37
0,9	0,04		0,52	0,77	0,01

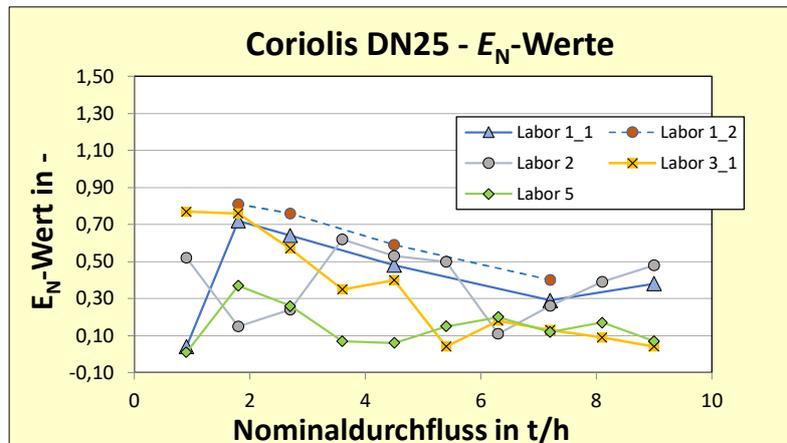


Abbildung 66: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Ergebnisse der E_N -Wertberechnung für die teilnehmenden Laboratorien

Test auf Tauglichkeit des Transfergerätes u_{Vergl}/u_{Labor}

Die Tauglichkeit des Transfergerätes kann für alle Laboratorien und Unsicherheiten bestätigt werden (Tabelle 63 und Abbildung 67).

Tabelle 63: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Zusammenfassung des Tauglichkeitstests für das Transfergerät mit dem Verhältniswert u_{Vergl}/u_{Labor}

Labor	Labor 1	Labor 1	Labor 2	Labor 3	Labor 5
Prüfstand	Prüfstand 1	Prüfstand 2		Prüfstand 1	
Datum	06./07.04.2018	06./07.04.2018	06./07.04.2018	12./13.07.2018	08./09.05.2018
Nominal-durch-fluss in t/h	u_{Vergl}/u_{Labor}	u_{Vergl}/u_{Labor}	u_{Vergl}/u_{Labor}	u_{Vergl}/u_{Labor}	u_{Vergl}/u_{Labor}
9,0	0,79		0,50	0,30	0,40
8,1			0,46	0,28	0,37
7,2	0,77	0,76	0,65	0,28	0,38
6,3			0,53	0,32	0,41
5,4			0,49	0,33	0,44
4,5	0,96	0,96	0,55	0,35	0,49
3,6			0,68	0,39	0,55
2,7	1,33	1,33	0,79	0,48	0,67
1,8	1,67	1,67	0,86	0,61	0,85
0,9	1,96		1,01	0,76	1,02

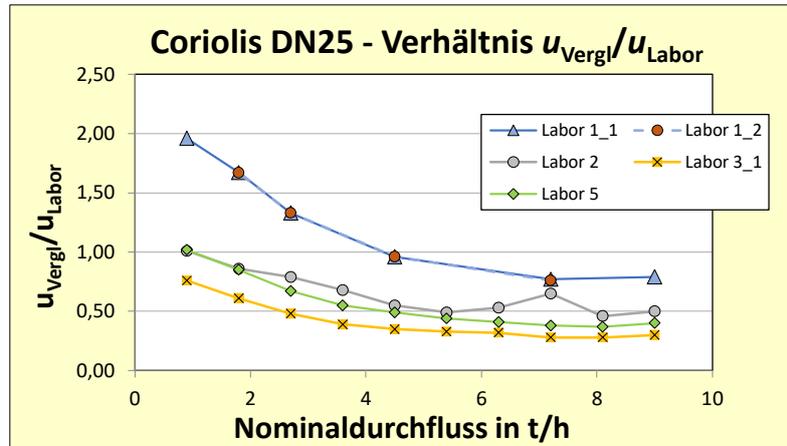


Abbildung 67: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Ergebnisse des Tests auf Tauglichkeit des Transfer-gerätes $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$ für die teilnehmenden Laboratorien

7.4.2 Einzelergebnisse der Laboratorien

Labor 2

Über den gesamten untersuchten Durchflussbereich konnten die Vergleichsmessungen alle die in Tabelle 64 angegebenen Prüfstandsunsicherheiten für eine Massekalibrierung bestätigen.

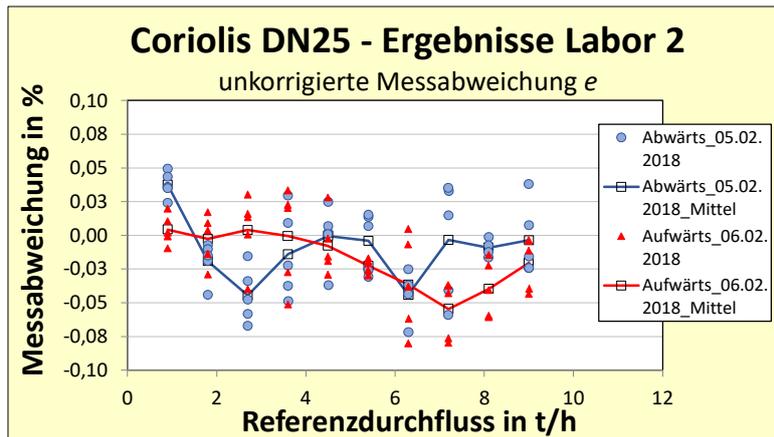


Abbildung 68: Kalibrierergebnisse Labor 2 - unkorrigierte Messabweichung e

Tabelle 64: Labor 2 - Ausgangsdaten für die Berechnung der E_N -Werte sowie von $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$. Die Werte von x_i basieren auf den temperaturkorrigierten Werten e_{korr} .

Nominal- durch- fluss	u_{Labor}		u_{TS}	Messabweichung		Standardabw.		Anzahl	
	Labor 2	PTB		Labor 2	PTB	Labor 2	PTB	Labor 2	PTB
in t/h	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %		
9,0	0,025	0,010	0,010	0,016	-0,014	0,024	0,004	10	10
8,1	0,025	0,010	0,009	0,004	-0,020	0,022	0,002	10	10
7,2	0,025	0,010	0,010	-0,001	-0,018	0,042	0,004	10	10
6,3	0,025	0,010	0,010	-0,012	-0,019	0,027	0,005	10	9
5,4	0,025	0,010	0,011	0,015	-0,017	0,018	0,005	10	10
4,5	0,025	0,010	0,012	0,024	-0,011	0,021	0,009	10	10
3,6	0,025	0,010	0,013	0,021	-0,021	0,033	0,003	10	9
2,7	0,025	0,010	0,017	0,008	-0,010	0,034	0,011	10	10
1,8	0,025	0,010	0,021	0,017	0,005	0,018	0,019	10	10
0,9	0,025	0,010	0,025	0,049	0,002	0,020	0,008	10	9

Tabelle 65: Labor 2 - Berechnung der Bewertungskriterien (E_N -Wert und $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Lab}}$) und Entscheidung für die Prüfstandsunsicherheit

Nominal- durch- fluss	$u(x_i)$	$u(y_2)$	d_{i,y_2}	$u(d_{i,y_2})$	$U(d_{i,y_2})$ $k = 2$	E_N -Wert $\leq 1,00$ bzw. $\leq 1,20$	$u_{\text{Vergl}}/$ u_{Lab} $\leq 2,00$	Entscheidung zur Prüfstands- unsicherheit
	Labor 2	PTB				Labor 2	Labor 2	Labor 2
in t/h	in %	in %	in %	in %	in %			
9,0	0,028	0,014	0,030	0,031	0,062	0,48	0,50	bestätigt
8,1	0,028	0,014	0,024	0,031	0,062	0,39	0,46	bestätigt
7,2	0,030	0,014	0,017	0,033	0,066	0,26	0,65	bestätigt
6,3	0,028	0,014	0,007	0,031	0,062	0,11	0,53	bestätigt
5,4	0,028	0,015	0,032	0,032	0,064	0,50	0,49	bestätigt
4,5	0,029	0,016	0,035	0,033	0,066	0,53	0,55	bestätigt
3,6	0,030	0,017	0,042	0,034	0,068	0,62	0,68	bestätigt
2,7	0,032	0,020	0,018	0,038	0,076	0,24	0,79	bestätigt
1,8	0,033	0,024	0,012	0,041	0,082	0,15	0,86	bestätigt
0,9	0,036	0,027	0,047	0,045	0,090	0,52	1,01	bestätigt

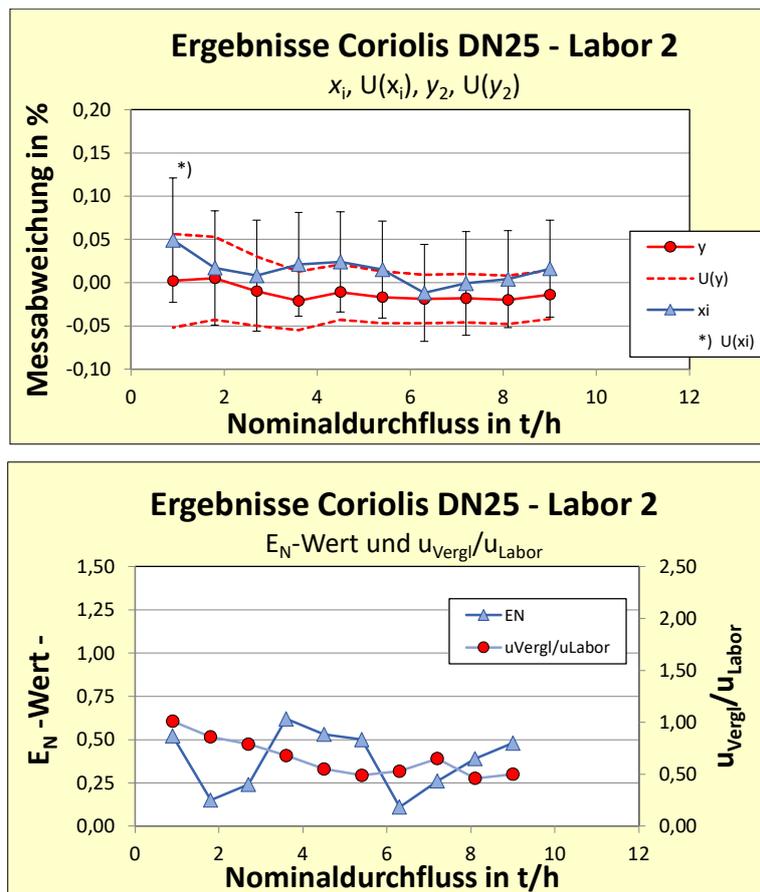


Abbildung 69: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Ergebnisse der Vergleichsmessungen für Labor 2

Labor 1 (Prüfstand 1)

Über den gesamten untersuchten Durchflussbereich konnten die Vergleichsmessungen alle die in Tabelle 66 angegebenen Prüfstandsunsicherheiten für eine Massekalibrierung bestätigen.

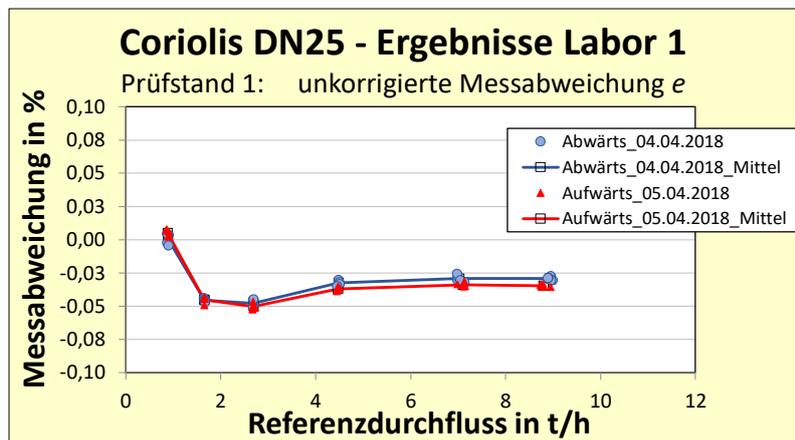


Abbildung 70: Kalibrierergebnisse Prüfstand Labor 1 (Prüfstand 1) - unkorrigierte Messabweichung e

Tabelle 66: Labor 1 (Prüfstand 1) - Ausgangsdaten für die Berechnung der E_N -Werte sowie von $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$. Die Werte von x_i basieren auf den temperaturkorrigierten Werten e_{korr} .

Nominal- durch- fluss	u_{Labor}		u_{TS}	Messabweichung		Standardabw.		Anzahl	
	Labor 1	PTB		x_i	y_2	x_i	y_2	x_i	y_2
				Labor 1	PTB	Labor 1	PTB	Labor 1	PTB
in t/h	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %		
9,0	0,013	0,010	0,010	-0,030	-0,014	0,003	0,004	10	10
8,1									
7,2	0,013	0,010	0,010	-0,030	-0,018	0,003	0,004	10	10
6,3									
5,4									
4,5	0,013	0,010	0,012	-0,033	-0,011	0,003	0,009	10	10
3,6									
2,7	0,013	0,010	0,017	-0,047	-0,010	0,003	0,011	10	10
1,8	0,013	0,010	0,021	-0,044	0,005	0,002	0,019	10	10
0,9	0,013	0,010	0,025	0,005	0,002	0,004	0,008	10	9

Tabelle 67: Labor 1 (Prüfstand 1) - Berechnung der Bewertungskriterien (E_N -Wert und $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Lab}}$) und Entscheidung für die Prüfstandsunsicherheit

Nominal- durch- fluss	$u(x_i)$	$u(y_2)$	d_{i,y_2}	$u(d_{i,y_2})$	$U(d_{i,y_2})$ $k = 2$	E_N -Wert $\leq 1,00$ bzw. $\leq 1,20$	$u_{\text{Vergl}}/$ u_{Lab} $\leq 2,00$	Entscheidung zur Prüfstands- unsicherheit
	Labor 1	PTB				Labor 1	Labor 1	
in t/h	in %	in %	in %	in %	in %			Labor 1
9,0	0,016	0,014	-0,016	0,021	0,042	0,38	0,79	bestätigt
8,1								
7,2	0,016	0,014	-0,012	0,021	0,042	0,29	0,77	bestätigt
6,3								
5,4								
4,5	0,017	0,016	-0,022	0,023	0,046	0,48	0,96	bestätigt
3,6								
2,7	0,021	0,020	-0,037	0,029	0,058	0,64	1,33	bestätigt
1,8	0,024	0,024	-0,049	0,034	0,068	0,72	1,67	bestätigt
0,9	0,028	0,027	0,003	0,039	0,078	0,04	1,96	bestätigt

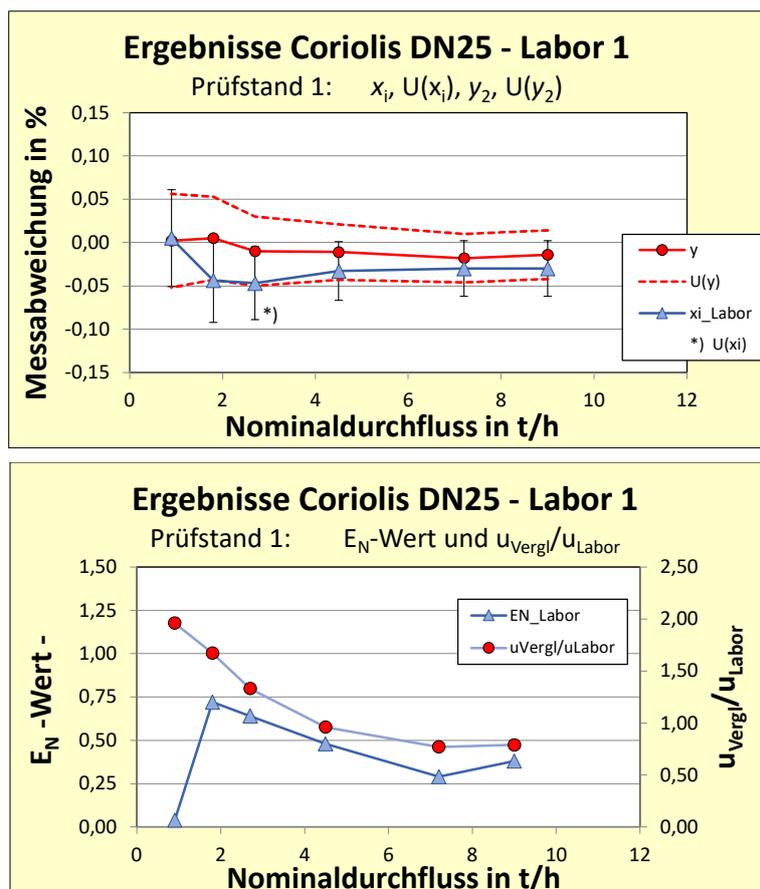


Abbildung 71: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Ergebnisse der Vergleichsmessungen für Labor 1 (Prüfstand1)

Tabelle 69: Labor 1_2 - Berechnung der Bewertungskriterien (E_N -Wert und $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Lab}}$) und Entscheidung für die Prüfstandsunsicherheit

Nominal- durch- fluss	$u(x_i)$	$u(y_2)$	d_{i,y_2}	$u(d_{i,y_2})$	$U(d_{i,y_2})$ $k = 2$	E_N -Wert $\leq 1,00$ bzw. $\leq 1,20$	$u_{\text{Vergl}}/$ u_{Lab} $\leq 2,00$	Entscheidung zur Prüfstands- unsicherheit
	Labor 1_2	PTB				Labor 1_2	Labor 1_2	Labor 1_2
in t/h	in %	in %	in %	in %	in %			
9,0								
8,1								
7,2	0,016	0,014	-0,017	0,021	0,042	0,40	0,76	bestätigt
6,3								
5,4								
4,5	0,017	0,016	-0,027	0,023	0,046	0,59	0,96	bestätigt
3,6								
2,7	0,021	0,020	-0,044	0,029	0,058	0,76	1,33	bestätigt
1,8	0,024	0,024	-0,055	0,034	0,068	0,81	1,67	bestätigt
0,9								

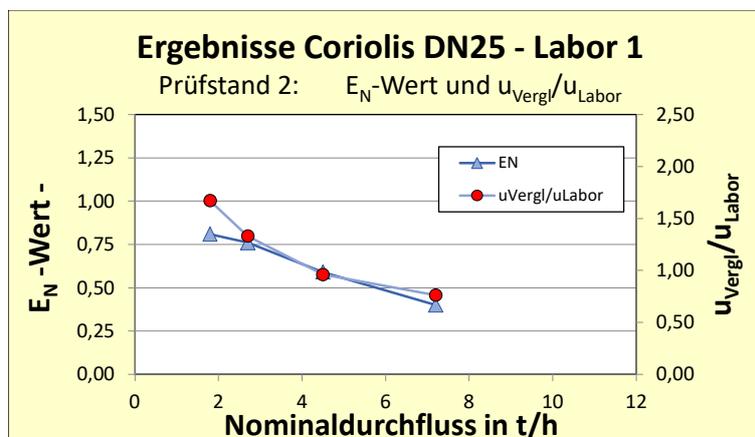
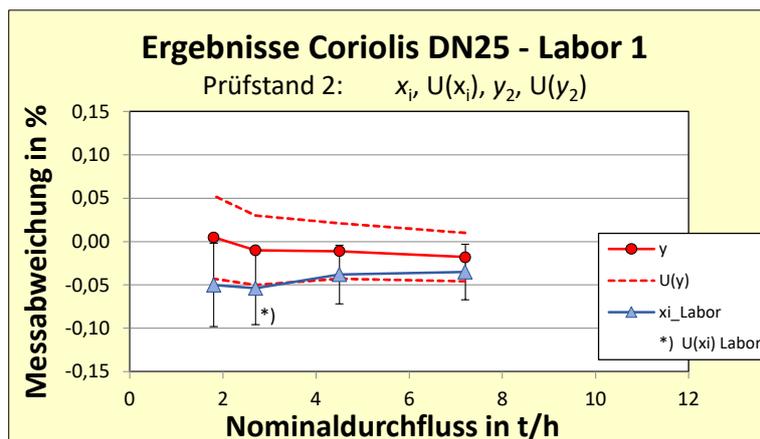


Abbildung 73: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Ergebnisse der Vergleichsmessungen für Labor 1 (Prüfstand 2)

Labor 5

Über den gesamten untersuchten Durchflussbereich konnten die Vergleichsmessungen alle die in Tabelle 70 angegebenen Prüfstandsunsicherheiten für eine Massekalibrierung bestätigen.

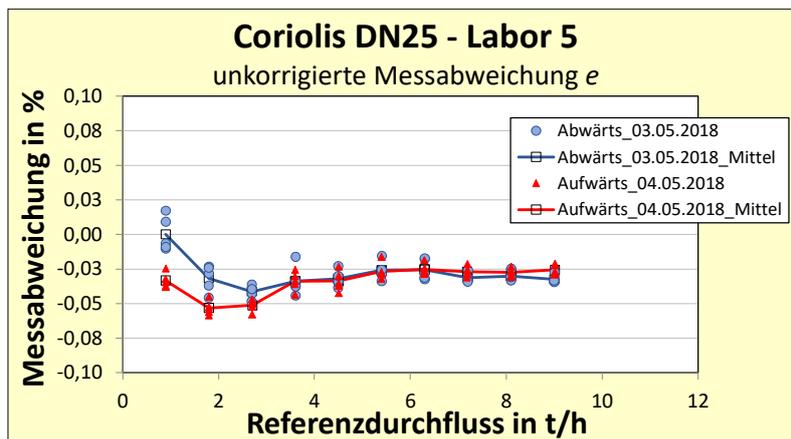


Abbildung 74: Kalibrierergebnisse Labor 5 - unkorrigierte Messabweichung e

Tabelle 70: Labor 5 - Ausgangsdaten für die Berechnung der E_N -Werte sowie von $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$. Die Werte von x_i basieren auf den temperaturkorrigierten Werten e_{korrr} .

Nominal- durch- fluss	u_{Labor}		u_{TS}	Messabweichung		Standardabw.		Anzahl	
				x_i	y_2	x_i	y_2	x_i	y_2
	Labor 5	PTB		Labor 5	PTB	Labor 5	PTB	Labor 5	PTB
in t/h	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %		
9,0	0,025	0,010	0,010	-0,010	-0,014	0,004	0,004	10	10
8,1	0,025	0,010	0,009	-0,010	-0,020	0,003	0,002	10	10
7,2	0,025	0,010	0,010	-0,011	-0,018	0,003	0,004	10	10
6,3	0,025	0,010	0,010	-0,007	-0,019	0,006	0,005	10	9
5,4	0,025	0,010	0,011	-0,008	-0,017	0,006	0,005	10	10
4,5	0,025	0,010	0,012	-0,015	-0,011	0,007	0,009	10	10
3,6	0,025	0,010	0,013	-0,016	-0,021	0,009	0,003	10	9
2,7	0,025	0,010	0,017	-0,029	-0,010	0,008	0,011	10	10
1,8	0,025	0,010	0,021	-0,025	0,005	0,015	0,019	10	10
0,9	0,025	0,010	0,025	0,001	0,002	0,022	0,008	10	9

Tabelle 71: Labor 5 - Berechnung der Bewertungskriterien (E_N -Wert und u_{Vergl}/u_{Lab}) und Entscheidung für die Prüfstandsunsicherheit

Nominal- durch- fluss	$u(x_i)$	$u(y_2)$	d_{i,y_2}	$u(d_{i,y_2})$	$U(d_{i,y_2})$ $k = 2$	E_N -Wert $\leq 1,00$ bzw. $\leq 1,20$	$u_{Vergl}/$ u_{Lab} $\leq 2,00$	Entscheidung zur Prüfstands- unsicherheit
	Labor 5	PTB				Labor 5	Labor 5	
in t/h	in %	in %	in %	in %	in %			
9,0	0,027	0,014	0,004	0,030	0,060	0,07	0,40	bestätigt
8,1	0,027	0,014	0,010	0,030	0,060	0,17	0,37	bestätigt
7,2	0,027	0,014	0,007	0,030	0,060	0,12	0,38	bestätigt
6,3	0,027	0,014	0,012	0,030	0,060	0,20	0,41	bestätigt
5,4	0,027	0,015	0,009	0,031	0,062	0,15	0,44	bestätigt
4,5	0,028	0,016	-0,004	0,032	0,064	0,06	0,49	bestätigt
3,6	0,029	0,017	0,005	0,034	0,068	0,07	0,55	bestätigt
2,7	0,030	0,020	-0,019	0,036	0,072	0,26	0,67	bestätigt
1,8	0,033	0,024	-0,030	0,041	0,082	0,37	0,85	bestätigt
0,9	0,036	0,027	-0,001	0,045	0,090	0,01	1,02	bestätigt

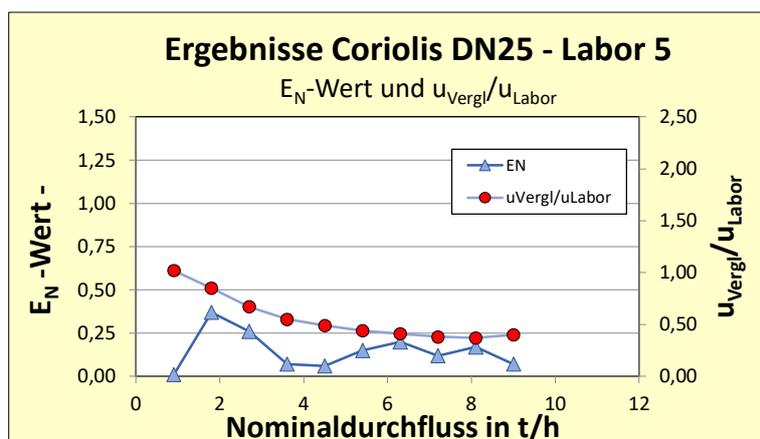
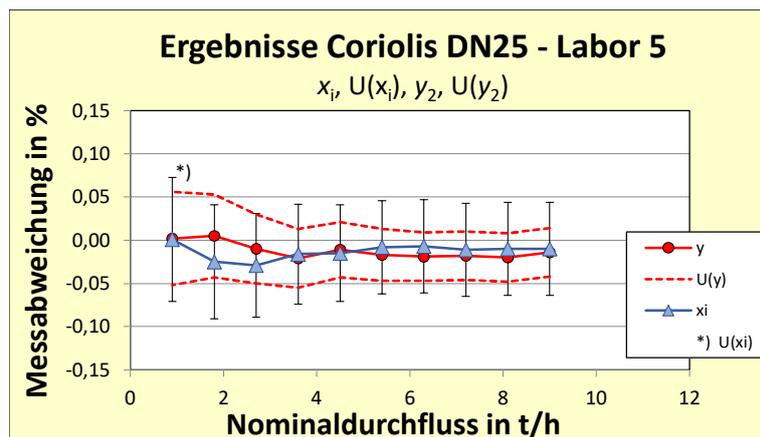


Abbildung 75: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Ergebnisse der Vergleichsmessungen für Labor 5

Labor 3 (Prüfstand 1)

Über den gesamten untersuchten Durchflussbereich konnten die Vergleichsmessungen alle die in Tabelle 72 angegebenen Prüfstandsunsicherheiten für eine Massekalibrierung bestätigen.

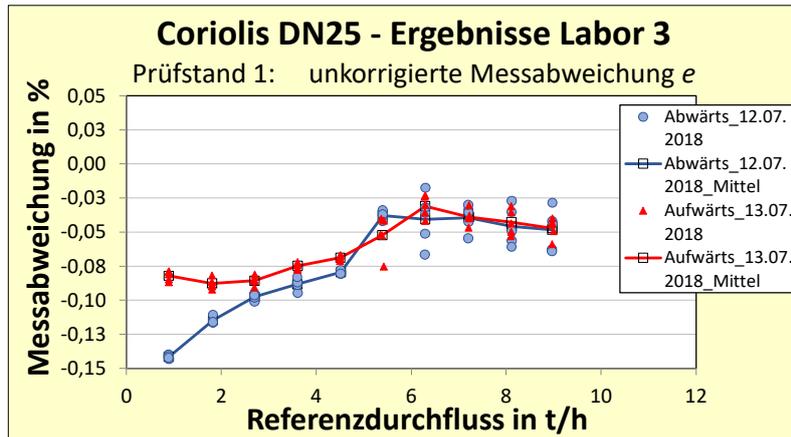


Abbildung 76: Kalibrierergebnisse Labor 3 (Prüfstand 1) - unkorrigierte Messabweichung e

Tabelle 72: Labor 3 (Prüfstand 1) - Ausgangsdaten für die Berechnung der E_N -Werte sowie von $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$. Die Werte von x_i basieren auf den temperaturkorrigierten Werten e_{korr} .

Nominal- durch- fluss	u_{Labor}		u_{TS}	Messabweichung		Standardabw.		Anzahl	
	Labor 3	PTB	in %	x_i	y_2	x_i	y_2	x_i	y_2
				Labor 3	PTB	Labor 3	PTB	Labor 3	PTB
in t/h	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %		
9,0	0,035	0,010	0,010	-0,017	-0,014	0,011	0,004	10	10
8,1	0,035	0,010	0,009	-0,013	-0,020	0,011	0,002	10	10
7,2	0,035	0,010	0,010	-0,008	-0,018	0,008	0,004	10	10
6,3	0,035	0,010	0,010	-0,005	-0,019	0,015	0,005	10	9
5,4	0,035	0,010	0,011	-0,014	-0,017	0,012	0,005	10	10
4,5	0,035	0,010	0,012	-0,043	-0,011	0,006	0,009	10	10
3,6	0,035	0,010	0,013	-0,050	-0,021	0,008	0,003	10	9
2,7	0,035	0,010	0,017	-0,060	-0,010	0,007	0,011	10	10
1,8	0,035	0,010	0,021	-0,068	0,005	0,014	0,019	10	10
0,9	0,035	0,010	0,025	-0,078	0,002	0,032	0,008	10	9

Tabelle 73: Labor 3 (Prüfstand 1) - Berechnung der Bewertungskriterien (E_N -Wert und $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Lab}}$) und Entscheidung für die Prüfstandsunsicherheit

Nominal- durch- fluss	$u(x_i)$	$u(y_2)$	d_{iy2}	$u(d_{iy2})$	$U(d_{iy2})$ $k = 2$	E_N -Wert $\leq 1,00$ bzw. $\leq 1,20$	$u_{\text{Vergl}}/$ u_{Lab} $\leq 2,00$	Entscheidung zur Prüfstands- unsicherheit
	Labor 3	PTB				Labor 3	Labor 3	Labor 3
in t/h	in %	in %	in %	in %	in %			
9,0	0,037	0,014	-0,003	0,040	0,080	0,04	0,30	bestätigt
8,1	0,036	0,014	0,007	0,039	0,078	0,09	0,28	bestätigt
7,2	0,036	0,014	0,010	0,039	0,078	0,13	0,28	bestätigt
6,3	0,037	0,014	0,014	0,040	0,080	0,18	0,32	bestätigt
5,4	0,037	0,015	0,003	0,040	0,080	0,04	0,33	bestätigt
4,5	0,037	0,016	-0,032	0,040	0,080	0,40	0,35	bestätigt
3,6	0,038	0,017	-0,029	0,042	0,084	0,35	0,39	bestätigt
2,7	0,039	0,020	-0,050	0,044	0,088	0,57	0,48	bestätigt
1,8	0,041	0,024	-0,073	0,048	0,096	0,76	0,61	bestätigt
0,9	0,044	0,027	-0,080	0,052	0,104	0,77	0,76	bestätigt

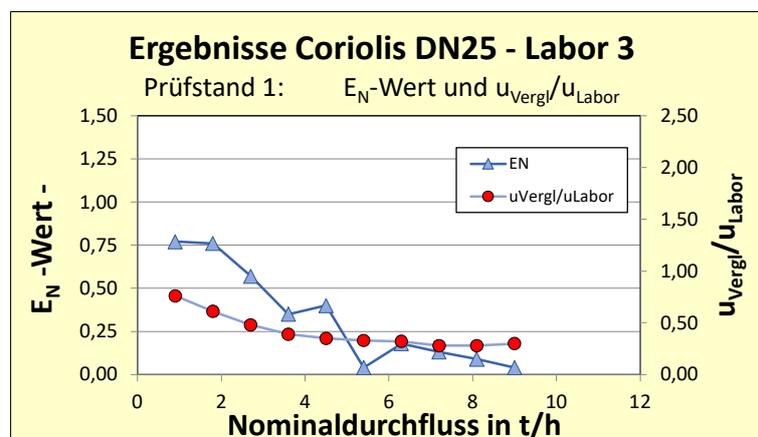
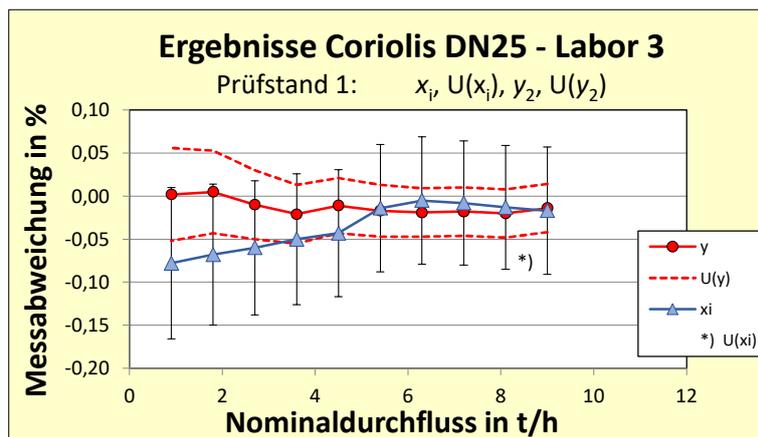


Abbildung 77: Gerät #3 (Coriolis DN25) - Ergebnisse der Vergleichsmessungen für Labor 3 (Prüfstand 1)

7.5 Kalibrierergebnisse - Gerät #4_Turbine DN150

7.5.1 Zusammenfassung

Laborergebnisse

Tabelle 74: Gerät #4 (Turbine DN150) - Relative Messabweichung x_i (%) der teilnehmenden Labore Mittelwerte der korrigierten Messabweichung aus Auf- und Abwärtskalibrierung

Labor	PTB_2		Labor 1
Prüfstand			Prüfstand 3
Datum	27.02. - 07.03.2018		04.04.2018
Nominaldurchfluss in m ³ /h	Messabweichung x_i in % = Referenzwert y_2 in %	$U(y_2)$ mit $k = 2$ in %	Messabweichung x_i in %
300 bis 600			Keine Messung
240	1,559	0,050	1,659
180	1,500	0,044	1,568
120	1,429	0,040	Keine Messung
60	1,232	0,062	1,411

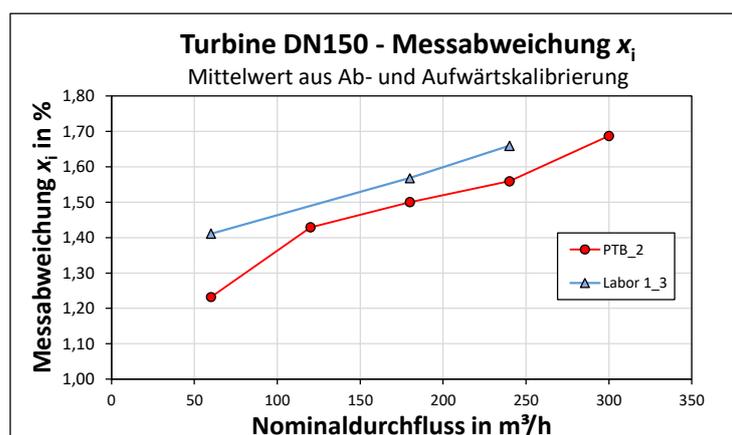


Abbildung 78: Gerät #4 (Turbine DN150) - Relative Messabweichung x_i (%) der teilnehmenden Laboratorien - Mittelwerte der korrigierten Messabweichung aus Ab- und Aufwärtskalibrierung

Referenzwert y_2 und $U(y_2)$

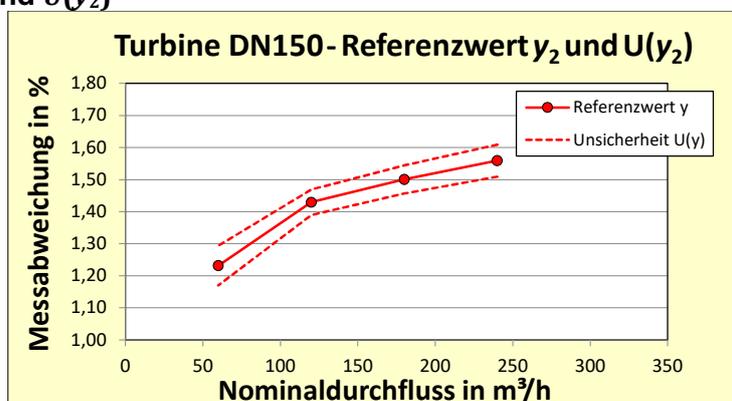


Abbildung 79: Gerät #4 (Turbine DN150) - Referenzwert y_2 (= PTB_2 Messung vom 27.02 bis zum 07.03.2018) als Mittelwert aus Ab- und Abwärtskalibrierung und Darstellung der erweiterten Unsicherheit $U(y_2)$ mit $k = 2$

7.5.2 Einzelergebnisse der Laboratorien

Labor 1 (Prüfstand 3)

Außer für den Durchfluss bei 60,0 m³/h, konnten die Vergleichsmessungen alle die in Tabelle 75 angegebenen Prüfstandsunsicherheiten für eine Volumenkalibrierung bestätigen. Bei einem Durchfluss von 60,0 m³/h war der E_N -Wert zu hoch (= 1,63).

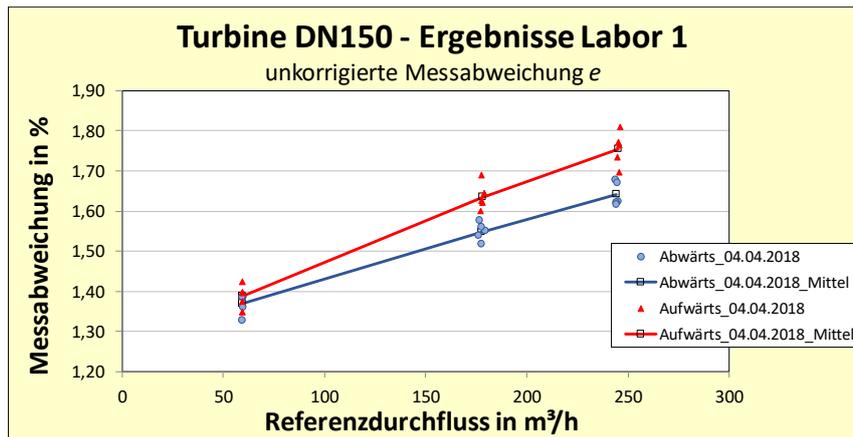


Abbildung 80: Kalibrierergebnisse Prüfstand Labor 1 (Prüfstand 3) - unkorrigierte Messabweichung e

Tabelle 75: Labor 1 (Prüfstand 3) - Ausgangsdaten für die Berechnung der E_N -Werte sowie für $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}}$. Die Werte von x_i basieren auf den temperaturkorrigierten Werten e_{korr}

Nominal-durchfluss	u_{Labor}		u_{TS}	Messabweichung		Standardabw.		Anzahl	
	Labor 1	PTB		Labor 1	PTB	Labor 1	PTB	Labor 1	PTB
in m ³ /h	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %		
240	0,035	0,010	0,022	1,659	1,559	0,072	0,010	10	9
180	0,035	0,010	0,019	1,568	1,500	0,052	0,009	10	10
120									
60	0,035	0,010	0,029	1,411	1,232	0,027	0,010	10	10

Tabelle 76: Labor 1 (Prüfstand 3) - Berechnung der Bewertungskriterien (E_N -Wert und $u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Lab}}$) und Entscheidung für die Prüfstandsunsicherheit

Nominal-durchfluss	$u(x_i)$	$u(y_2)$	d_{i,y_2}	$u(d_{i,y_2})$	$U(d_{i,y_2})$ $k = 2$	E_N -Wert $\leq 1,00$ bzw. $\leq 1,20$	$u_{\text{Vergl}}/u_{\text{Labor}} \leq 2,00$	Entscheidung zur Prüfstandsunsicherheit
in m ³ /h	in %	in %	in %	in %	in %	Labor 1_3	Labor 1_3	Labor 1_3
240	0,047	0,025	0,100	0,053	0,106	0,94	0,92	bestätigt
180	0,043	0,022	0,068	0,048	0,096	0,70	0,71	bestätigt
120								
60	0,046	0,031	0,179	0,055	0,110	1,63	0,87	abgelehnt

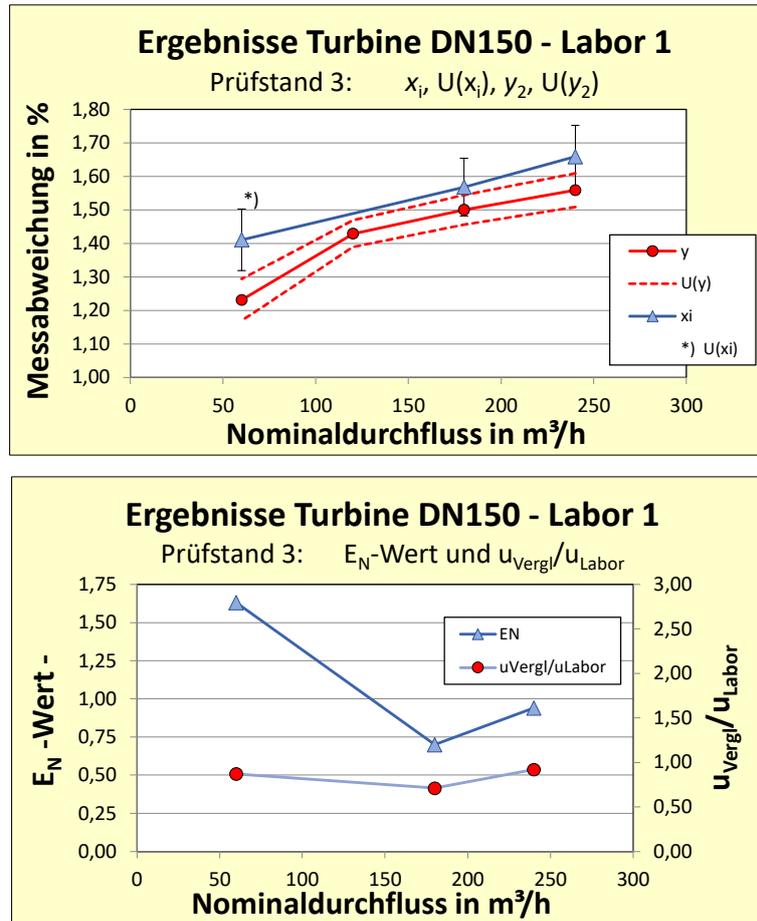


Abbildung 81: Gerät #3 (Turbine DN150) - Ergebnisse der Vergleichsmessungen Labor 1 (Prüfstand 3)

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	90 / 93

8 Formelzeichen und Abkürzungen

d_i	Abweichung der Ergebnisse x_i vom Labor i zum Referenzwert y (%)
e	Messabweichung bei aktueller Fluidtemperatur (%)
e_{korr}	Temperaturkorrigierte Messabweichung (%)
e_m	Relative Messabweichung für Masse (%)
e_{nom}	Messabweichung bei nominaler Fluidtemperatur 20 °C (%)
Δe_{korr}	Korrekturwert für die Messabweichung (%)
Δe_{nom}	Differenz der Messabweichung (%)
$E_{N,i}$	Normalisierter Grad der Übereinstimmung (-)
e_V	Relative Messabweichung für Volumen (%)
f_{Ausgang}	Ausgangssignal Frequenz des Transfergerätes (Hz)
i	Laborindex
k	Erweiterungsfaktor (-)
K_m	Geräte- K -Faktor für den Masseausgang des Transfergerätes (Impulse/kg)
$K_{m,\text{nom}}$	Nominaler K -Faktor des Massedurchflussmessgerätes (Impulse/kg)
K_V	Geräte- K -Faktor für den Volumenausgang des Transfergerätes (Impulse/L)
DK_V	Difference in meter K -factor of turbine meter (%)
$K_{V,\text{nom}}$	Nominaler K -Faktor des Volumendurchflussmessgerätes (Impulse/L)
m_{Ref}	Referenzmasse (kg)
\dot{m}_{Ref}	Referenzmassedurchfluss (t/h)
n	Anzahl der Kalibrierungen je Durchflusspunkt
N_{Impulse}	Anzahl der mit dem Transfergerät gezählten Impulse (Impulse)
p_{Proz}	Prozessdruck in der Rohrleitung (bar)
s_i	Standardabweichungen der Einzelmessungen je Durchflusspunkt (%)
t_{Mess}	Messzeit (s)
T_{Luft}	Lufttemperatur während der Kalibrierungen (°C)
T_{Fluid}	Aktuelle Temperatur Kalibrierflüssigkeit (°C)
ΔT_{Fluid}	Differenz zwischen aktueller und nominaler Temperatur Kalibrierflüssigkeit (°C)
T_{nom}	Nominale Temperatur Kalibrierflüssigkeit = 20°C
u_{TS}	Gesamtunsicherheit des Transfergerätes (%)
u_{Drift}	Unsicherheit aufgrund der Gerätedrift (%)
u_{Druck}	Unsicherheit aufgrund der Drucksensitivität (%)
u_{Einlauf}	Unsicherheit in Bezug auf Einlaufbedingungen (%)
$u_{\text{Labor},i}$	Standardunsicherheit des Kalibrierstandes i (%)

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	91 / 93

u_{Stab}	Standardunsicherheit bei Abweichungen zum Nominaldurchfluss (%)
u_{Reprod}	Standardunsicherheit aufgrund der Reprucibilityeigenschaften (%)
u_{Temp}	Standardunsicherheit aufgrund der Temperatursensitivität (%)
u_{Vergl}	Standardunsicherheiten der Messungen mit dem Transfergerät im Labor i (%)
$U(d_i)$	Erweiterte Unsicherheit ($k = 2$) von d_i (%)
u_{y_1}	Standardunsicherheit des Referenzwertes y_1 (%)
u_{y_2}	Standardunsicherheit der Messabweichungen x_i im Pilotlabor (%)
$U(y_1)$	Erweiterte Unsicherheit des Referenzwertes y_1 mit $k = 2$ (%)
$U(y_2)$	Erweiterte Unsicherheit des Referenzwertes y_2 mit $k = 2$ (%)
$u_{x,i}$	Standardunsicherheit der Messabweichungen x_i (%)
V	Referenzvolumen (m^3)
\dot{V}_{Ref}	Referenzvolumendurchfluss (m^3/h)
x_i	Mittelwert der Messabweichung zur E_N -Wertberechnung in (%)
y	Referenzwert y_1 bzw. y_2 (%)
y_1	Referenzwert als gewichtetes Mittel aus den Laborergebnissen (%)
y_2	Ergebnisse Pilotlabor als Referenzwert (%)

CCM	-	Consultative Committee for Mass and Related Quantities
CIPM	-	Comité International des Poids et Mesures
DoE	-	Degree of Equivalence
DKD	-	Deutscher Kalibrierdienst
DN	-	Nomineller Rohrdurchmesser in mm
GUM	-	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HDP	-	Hydrodynamisches Prüffeld
MID	-	Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät
PTB	-	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
WGFF	-	(CCM) Working Group on Fluid Flow

	Ringvergleich Flüssigkeiten Juni 2017 bis Dezember 2020 https://doi.org/10.7795/550.20220609	DKD-V 11-3	
		Ausgabe:	04/2022
		Revision:	0
		Seite:	92 / 93

9 Literaturverzeichnis

- [1] Technisches Protokoll – DKD-Ringvergleich „Flüssigkeiten“, unveröffentlicht, Stand 08/2018
- [2] Engel, R.: Messunsicherheiten in der Durchflussmessung: Der Weg zum Messunsicherheitsmodell und zur Unsicherheitsanalyse – Teil 1, In: tm - Technisches Messen 81 (2014), No. 10, S. 485 - 498
- [2] GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM 100:2008.
- [3] BIPM: WGFF Guidelines for CMC Uncertainty and Calibration Report Uncertainty. 21. Oktober 2013, <http://www.bipm.org/utis/en/pdf/ccm-wgff-guidelines.pdf>
- [4] Wright, J. et al. (2016): Transfer standard uncertainty can cause inconclusive inter-laboratory comparisons. In: Metrologia 53 (2016), S. 1243 - 1258
- [5] Cox, M. G.: Evaluation of key comparison data. In: Metrologia 39 (2002), S. 589 - 595



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de