

## EINSATZ DER LASER DOPPLER VELOCIMETRIE ZUR ÜBERWACHUNG DER MESSUNSICHERHEIT VON DURCHFLUSSSENSOREN IM EINBAUZUSTAND

### APPLICATION OF LASER DOPPLER VELOCIMETRY FOR MONITORING OF MEASUREMENT UNCERTAINTY OF FLOW SENSORS UNDER INSTALLATION CONDITIONS

**Müller, Ulrich<sup>1</sup>; Dues, Michael<sup>2</sup>, Utz, Michael<sup>3</sup>, Lederer, Thomas<sup>4</sup>, Büker, Oliver<sup>4</sup>**

<sup>1)</sup> OPTOLUTION GmbH, CH - 4153 Reinach,

<sup>2)</sup> INTELLIGENT LASER APPLICATIONS GmbH, D - 52428 Jülich

<sup>3)</sup> FERNWÄRME WIEN Ges.m.b.H., A – 1090 Wien

<sup>4)</sup> PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT, D – 10587 Berlin

Geschwindigkeitsverteilungen, gestörte und instationäre Strömungsverhältnisse;  
Measurement of distributions of flow velocities, disturbed and unsteady flow conditions.

#### Zusammenfassung

In dem Beitrag werden Entwicklungsschritte für ein Verfahren zur Ermittlung und Überwachung der Messunsicherheiten von konventionellen Durchfluss-Sensoren im Einbauzustand vorgestellt. Die Ergebnisse von Messungen des Volumenstromes unter ungestörten und gestörten Strömungsverhältnissen sowohl bei zeitlich konstanten als auch zeitlich variierenden Volumenströmen unter verschiedenen Versuchsbedingungen werden diskutiert. Die erzielten Messunsicherheiten sind deutlich kleiner als 1 %. Besondere Beachtung finden die Strömungskonditionierung, die Analyse und Optimierung der Messunsicherheiten sowie die Minimierung der notwendigen Messzeiten. Das Messverfahren wird augenblicklich unter praxisnahen Bedingungen an einer Rohrschleife in einem Heizkraftwerk in DN 400 bei Volumenströmen bis 1'000 m<sup>3</sup>/h ( $T_{\max} = 120 \text{ °C}$ ,  $p_{\max} = 25 \text{ bar}$ ) erprobt und optimiert.

#### 1. Einleitung

Die Messunsicherheiten von den meisten Messgeräten zur Erfassung des Volumens bzw. Volumenstromes von Flüssigkeiten und Gasen (Durchfluss-Sensoren) sind unter anderem von den am Einbauort vorliegenden Geschwindigkeitsverteilungen abhängig. Die Strömungsverhältnisse an den Einbauorten der Durchfluss-Sensoren (DFS) werden durch anlagentechnische Gegebenheiten beeinflusst und weichen daher oft von den bei der Kalibrierung auf den Prüfständen vorliegenden idealen rotationssymmetrischen, vollentwickelten und drallfreien Geschwindigkeitsverteilungen ab. Darüber hinaus können zusätzliche Abweichungen zu den Kalibrierbedingungen durch Unterschiede bei der Mediumtemperatur und der Leitfähigkeit sowie durch Ablagerungen und Alterungseffekte an den Sensoren auftreten, so dass die tatsächlichen Messunsicherheiten der Messgeräte im Einbauzustand oft nur unzureichend bekannt sind. Neben der Notwendigkeit der Minimierung der Empfindlichkeit der Durchfluss-Sensoren auf veränderte Strömungsverhältnisse, besteht hohes Interesse an einem praktikablen Verfahren zur Ermittlung und Überwachung der Messunsicherheiten von konventionellen DFS im Einbauzustand.

# 44.2

Auf der GALA 2006 wurde durch die beiden erstgenannten Autoren eine neue Messtechnologie für die Laser Doppler Velocimetrie (LDV) vorgestellt, die eine Messung der lokalen Geschwindigkeiten an beliebigen Orten über den gesamten Rohrquerschnitt erlaubt [1]. Aufbauend auf dieser Messtechnologie wird derzeit ein von der Strömungscharakteristik unabhängiges Messverfahren für die Bestimmung des Volumenstromes von in Rohrleitungen strömenden Flüssigkeiten unter praxisnahen Bedingungen entwickelt. Das Verfahren wird zur Überprüfung von installierten Durchfluss-Sensoren grosser Nennweite von Wärmezählern unter Betriebsbedingungen eingesetzt werden. Die Validierung des Messverfahrens erfolgt an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) Berlin, Fachbereich Wärme.

Die Aktivitäten erfolgen in einem gemeinsamen Projekt mit der Fernwärme Wien. Übergeordnetes Ziel ist die Verbesserung von Messrichtigkeit und Messbeständigkeit von Grosswärme-Messstellen und Übergabestationen und somit eine Erhöhung der Messsicherheit im geschäftlichen Verkehr.

## 2. Stationäre Bedingungen am Prüfstand

### 2.1 Messung der Geschwindigkeitsverteilungen

Die Entwicklung und erste Erprobung des Messverfahrens erfolgen am Grosswärme-Prüfstand der PTB Berlin. Dieser Prüfstand erlaubt bei Rohrnennweiten von DN 50 bis DN 400 Volumenströme von 3 m<sup>3</sup>/h bis 1'000 m<sup>3</sup>/h und Temperaturen von 3°C bis 90°C. Es werden Messungen bei stationären und instationären Betriebsbedingungen bzgl. des Volumenstromes für verschiedenste Strömungszustände und Installationsbedingungen durchgeführt.

Bei stationären Bedingungen erfolgen Untersuchungen im Bereich von 3 m<sup>3</sup>/h bis 160 m<sup>3</sup>/h für ungestörte und gestörte Strömungsverhältnisse. Zur Reduzierung der Auswirkungen von durch Drittelblenden und Drallerzeuger nach EN 1434 gestörten Strömungszuständen wird der Messstrecke eine Düse vorgeschaltet. Das Messgitter für die Aufnahme der LDV-Geschwindigkeiten kann mittels des in [1] vorgestellten Verfahrens individuell an die jeweiligen Strömungsverhältnisse angepasst werden. Die Abbildung 1 zeigt den Messaufbau für die Rohrdimension DN 80 mit Düse, Fensterkammer und LDV-Messsonde (ILA GmbH). Innerhalb der Fensterkammer befindet sich ein von dem Fluid (hier Wasser) durchströmtes, druckentlastetes, kalibriertes Glasrohr, dessen Durchmesser exakt dem der Rohrleitung angepasst ist.

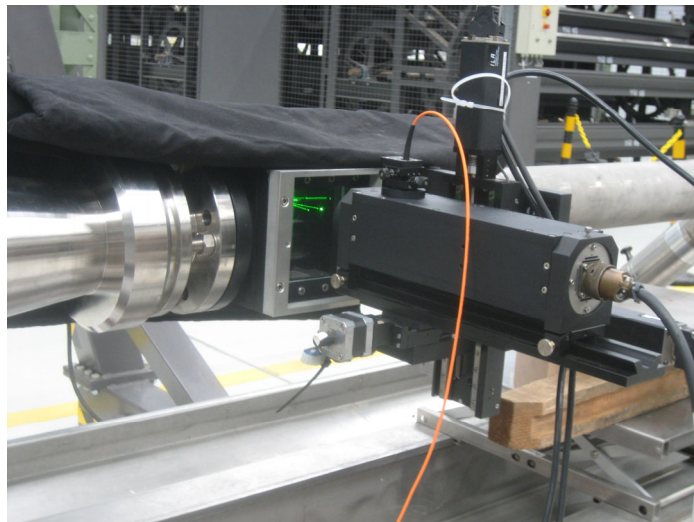


Abbildung 1: Messaufbau am PTB-Grosswärme-Prüfstand mit Düse (DN 200 auf DN 80), Fensterkammer und LDV-Messsonde

Die strömungskonditionierende Wirkung der eingesetzten Düse bei durch eine Drittelblende gestörten Strömungsverhältnissen verdeutlicht die Abbildung 2. Die gewählte Konditionierung führt ferner zu einer Verkleinerung der Turbulenzgrade und einer Reduzierung der Abhängigkeit der Verteilungsform von der REYNOLDS-Zahl.

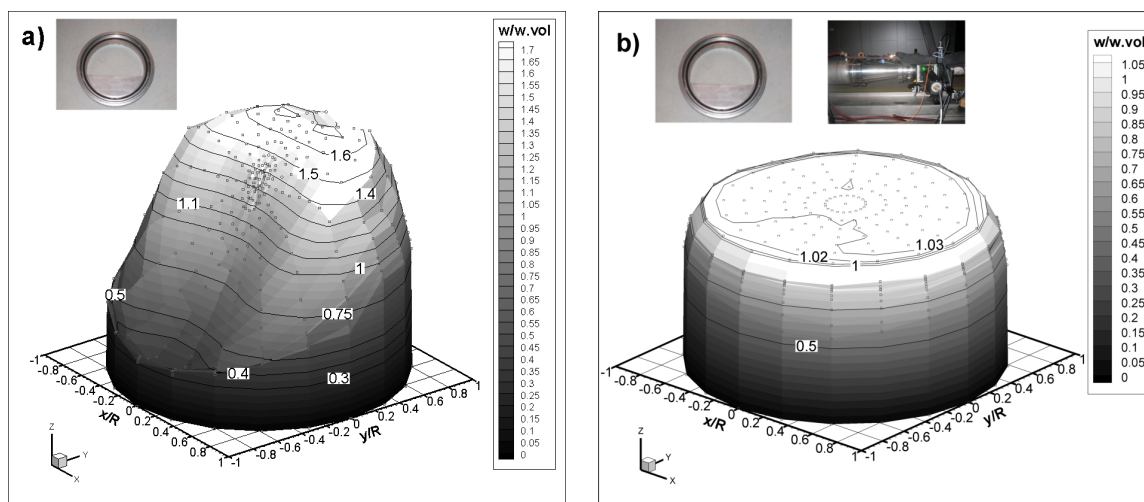


Abbildung 2: Beispiel zur Wirkung der Strömungskonditionierung mittels Düse bei gestörter Zuströmung (a) ohne Konditionierung: 1/3-Blende im Abstand von 2D von der Messenebene; b) mit Konditionierung: 1/3-Blende direkt vor Düse und 7,5 D von der Messenebene; Fluidparameter:  $Q = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_W = 50 \text{ °C}$ ,  $Re = 240'000$ ; 341 Messpunkte im Rohrquerschnitt mit  $D = 80,0 \text{ mm}$ ;  $w$  ... axiale Geschwindigkeit,  $w_{vol}$  ... volumetrische Geschwindigkeit)

## 2.2 Ermittlung der Volumenströme

Der Volumenstrom während einer Messung wird durch numerische Integration der gemessenen axialen Geschwindigkeiten an den Messpunkten ermittelt. Zur Erkennung und Korrektur offensichtlicher Fehlmessungen (z. B. infolge von zu geringen Datenraten durch lokale Verschmutzungen auf Oberflächen oder optischen Unregelmässigkeiten im Glas) werden die Differenzenabweichungen benachbarter Messwerte einer detaillierten Analyse unterzogen. Anschliessend werden auf der Basis des Messpunktrasters und der überprüften Messwerte weitere Daten für die Integration durch angepasste Interpolationen unter genauer Beachtung der jeweiligen ortsabhängigen Randbedingungen erzeugt (Erzeugung eines Integrationsgitters durch Verfeinerung des Messpunkt-Gitters). Die bekannte und fehlerbehaftete Korrektur von Wandzonen mit grossen Geschwindigkeitsgradienten unter Zuhilfenahme theoretischer Ansätze ist somit nicht notwendig, weil diese Wandzonen durch Anpassung des Messgitters genau beschrieben werden. Die Geschwindigkeit am Rohrrinnenrand wird auf Grund der Wandhaftbedingung gleich Null gesetzt. Die letztendliche Berechnung des Volumenstromes erfolgt durch Integration des durch Interpolation verfeinerten Geschwindigkeitsnetzes auf dem Rohrquerschnitt.

Für die Berechnung der Volumenströme werden zwei unabhängig voneinander programmierte, leicht verschiedene Algorithmen eingesetzt. In Tabelle 1 sind die ermittelten Abweichungen der aus den LDV-Geschwindigkeitsmesswerten berechneten Volumenströme gegenüber den mit den Gebrauchsnormalen am Prüfstand gemessenen Volumenströmen zusammengestellt. Die kleinsten mittleren Abweichungen treten erwartungsgemäss bei ungestörten und zusätzlich konditionierten Strömungszuständen auf. Bei gestörten Strömungsverhältnissen betragen die grössten Einzel-Abweichungen jedoch auch noch weniger als 0,70 %. Die Differenzen zwischen den beiden Algorithmen betragen weniger als 0,20 %.

## 44.4

Tabelle 1: Abweichungen der aus LDV-Geschwindigkeiten berechneten Volumenströme gegenüber den mit Gebrauchsnormalen gemessenen Volumenströmen am Grosswärmepfprüfstand der PTB Berlin (Volumenstrom-Bereich 3 m<sup>3</sup>/h bis 160 m<sup>3</sup>/h, Messstrecken in DN 50 und DN 80)

Parameter	Algorithmus	Abweichungen des Volumenstromes in %			
		Strömungszustand			
		ungestört		gestört	
		unkonditioniert	konditioniert	unkonditioniert	konditioniert
Mittelwert	A	0,34	-0,23	0,57	-0,50
	B	0,25	-0,33	0,47	-0,56
Minima	A	0,11	-0,59	0,53	-0,56
	B	0,01	-0,76	0,41	-0,64
Maxima	A	0,56	0,14	0,62	-0,48
	B	0,49	-0,04	0,53	-0,47

### 2.3 Abschätzung der Messunsicherheiten

Die Messunsicherheit für die Ermittlung von Volumenströmen aus mittels LDV gemessenen Geschwindigkeiten setzt sich aus den Unsicherheiten bei der Messung der lokalen Geschwindigkeiten und den Unsicherheiten bei der anschliessenden Berechnung des Volumenstromes zusammen. Die Abbildung 3 zeigt eine Aufschlüsselung der wesentlichen Einflussfaktoren.

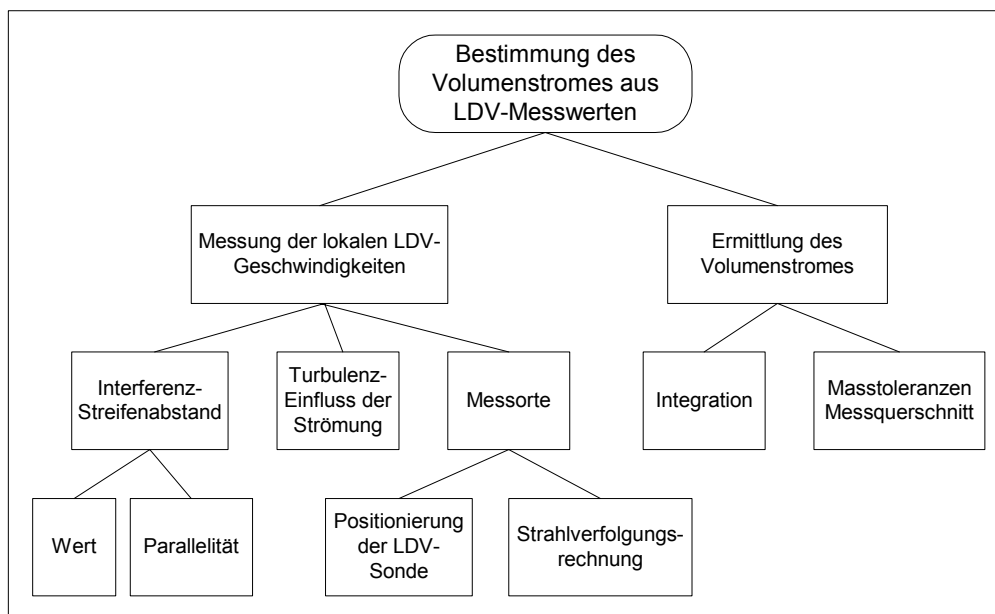


Abbildung 3: Wesentliche Einflussfaktoren bei der Ermittlung des Volumenstroms aus LDV-Geschwindigkeitsmesswerten

Die Unsicherheit der Integration ist wesentlich von der Anzahl und Verteilung der Messpunkte im Strömungsquerschnitt abhängig. Einen Anhalt über die erreichbare Unsicherheit der Interpolation und Integration mit dem jeweiligen Messpunktraster geben formelmässig bekannte, analytisch exakt zu berechnende Referenz-Geschwindigkeitsverteilungen. Derartige Beschreibungen von an die Praxis angelehnten Geschwindigkeitsverteilungen sind einerseits aus der Literatur bekannt [z. B. 2, 3], können jedoch bei Kenntnis von realen Verteilungen auch individuell ermittelt und berechnet werden. In der Abbildung 4 sind gefundene analytische Referenzverteilungen mit realen Geschwindigkeits-Profilen für unkonditionierte und konditionierte Strömungszustände verglichen.

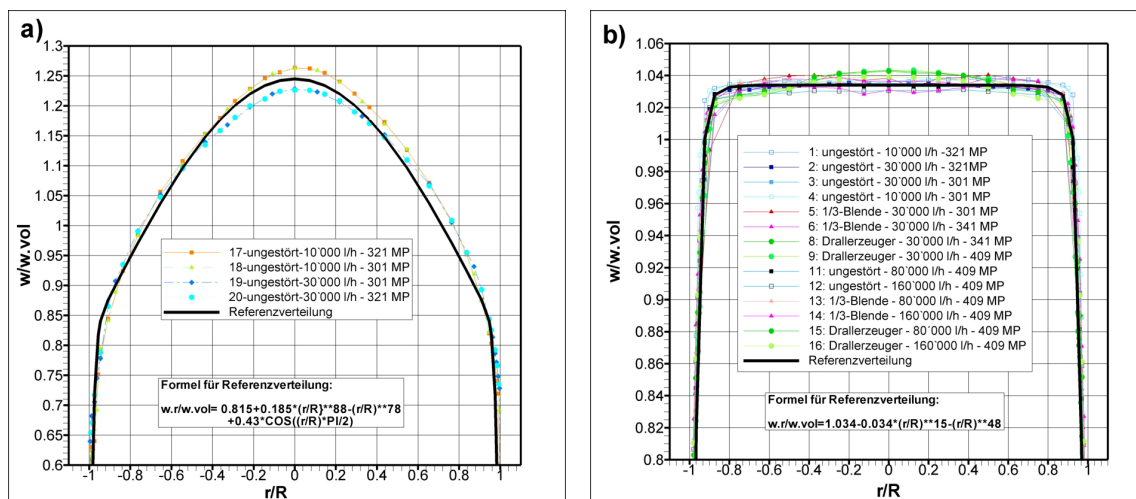


Abbildung 4: Vergleich von gemessenen Geschwindigkeits-Profilen mit Referenzverteilungen für a) unconditionierte, ungestörte Strömungszustände sowie b) konditionierte, ungestörte und gestörte Strömungszustände (MP ... Messpunkte im Rohrquerschnitt)

Zur Abschätzung der Unsicherheit werden die Geschwindigkeiten der Referenzverteilungen an den Punkten des gewählten Messpunktrasters zunächst analytisch berechnet, anschließend werden die Interpolationen und die Integrationen als numerische Vergleichsrechnung in gleicher Weise wie bei der zu untersuchenden Geschwindigkeitsverteilung (bzw. dem jeweiligen Volumen) durchgeführt. Die realisierte Unsicherheit des Referenzvolumens kann durch Vergleich des numerisch bestimmten Integrationsvolumens mit dem analytisch berechneten exakten Volumen bestimmt werden. Somit ist die Unsicherheit des aus den gemessenen Geschwindigkeitswerten berechneten Volumens ähnlich der Unsicherheit des betreffenden Referenzvolumens. Die auf diese Weise abgeschätzten erweiterten Unsicherheiten (Erweiterungsfaktor = 2) für die Integration von durch Drittelblenden bzw. Drallerzeuger gestörten unconditionierten und konditionierten Geschwindigkeitsverteilungen mit nicht optimierten Messgittern betragen derzeit maximal 0,20 %. Die Unsicherheiten sind von der Lage und der Anzahl der Messpunkte im Rohrquerschnitt in Bezug zur jeweiligen Geschwindigkeitsverteilung abhängig.

Zusätzlich kann mit Hilfe der gefundenen Referenzverteilungen die Lage und die Anzahl der Messpunkte durch Vergleich verschiedener implementierter Algorithmen an die aktuelle Strömungscharakteristik angepasst und somit optimiert werden, wodurch die Integrationsunsicherheit und die Messzeit reduziert werden können. Folglich kann bei bekannter Strömungscharakteristik dann von vielen Messpunkten über den Rohrquerschnitt (Messgitter) zu wenigen, speziell platzierten Messpunkten übergegangen werden (Mehrpunkt-Messungen).. So wird z. B. die abgeschätzte erweiterte Integrationsunsicherheit für einen mit einer Drittelblende gestörten und anschließend konditionierten Strömungszustand von 0,16 % bei 341 Messpunkten durch Optimierung des Messgitters auf 0,07 % bei nur noch 57 Messpunkten reduziert.

Die maximale Gesamt-Messunsicherheit für die Ermittlung des Volumenstromes aus LDV-Geschwindigkeitsmesswerten mit den Einflussfaktoren gemäß Abbildung 3 beträgt bei den untersuchten Strömungsverhältnissen augenblicklich ca. 0,66 %. Möglichkeiten zur weiteren Reduzierung der Messunsicherheit ergeben sich durch eine spezielle Strahlführung in der LDV-Sonde, eine Optimierung der Messgitter und eine ständige Verfeinerung der Algorithmen zur Berechnung des Volumenstromes. Für die exaktere Ermittlung des Interferenzstreifenabstandes und dessen Parallelität befindet sich bei der ILA GmbH eine neue Messeinrichtung mit Messunsicherheiten von ca. 0,10 % derzeit in der Erprobung.

### 3. Instationäre Bedingungen am Prüfstand

#### 3.1 Normalisierung der Geschwindigkeitsverteilungen

In realen Anlagen schwankt auf Grund der unterschiedlichen Verbraucherlasten häufig der Volumenstrom während der Messung der Geschwindigkeitsverteilung – folglich müssen die erhaltenen Messwerte korrigiert werden. Hierzu wird für die Dauer jeder LDV-Messung (bestehend aus vielen einzelnen Einzelsignalen) an einem Messpunkt im Rohrquerschnitt der Volumenstrom mit der Anzeige eines Bezugs-DFS (bei der vor-Ort-Überwachung der eigentliche Prüfling) korrigiert.

Dieser DFS besitzt eine unbekannte Messunsicherheit - vorausgesetzt wird, dass die Messunsicherheit konstant über dem instationären Volumenstrom-Bereich ist. Der fehlerbehaftete Volumenstrom wird auf die volumetrische Geschwindigkeit am Messort umgerechnet und dient zur Normalisierung der LDV-Geschwindigkeitsmesswerte. Aus den normalisierten (fehlerbehafteten) Geschwindigkeitsverhältnissen wird anschliessend mittels Interpolationen und Integrationen ein Referenzwert ermittelt:

$$V_{ref} = \int_0^{\pi^2} \left( \frac{w_{LDV}}{w_0} \right)_i \cdot dF \quad (1)$$

mit  $w_{LDV}$  lokale, mittels LDV gemessene axiale Geschwindigkeit

$w_0$  aus dem Volumenstrom des Bezugs-DFS berechnete, mittlere volumetrische Geschwindigkeit am Messort während der Messung von  $w_{LDV}$

$i$  Nummer der Messpunkte einer Geschwindigkeitsverteilung

$dF$  Rohrquerschnitts-Fläche

Dieser Referenzwert wird mit der über der gesamten LDV-Messzeit gemittelten volumetrischen (wiederum fehlerbehafteten) Geschwindigkeit im Messquerschnitt multipliziert:

$$\bar{Q}(\Delta t) = V_{ref} \cdot \left( \frac{\sum_{i=1}^n w_0(i)}{n} \right) = V_{ref} \cdot \bar{w}_0(\Delta t) \quad (2)$$

mit  $n$  Anzahl der Messpunkte der Geschwindigkeitsverteilung

$\bar{w}_0(\Delta t)$  während der Messung der Geschwindigkeitsverteilung zeitliche gemittelte, aus dem Volumenstrom des Bezugs-DFS berechnete volumetrische Geschwindigkeit am Messort

$\bar{Q}(\Delta t)$  gemittelter Volumenstrom während der Messung der Geschwindigkeitsverteilung

Der so ermittelte Volumenstrom bildet ein absolutes Mass für den zeitlich gemittelten Volumenstrom während der LDV-Messung und ist nicht mehr mit der unbekanntenen Messunsicherheit des Bezugs-DFS behaftet. Zusätzlich kann mittels Gleichung (3) der aktuelle Volumenstrom zu jeder Zeit  $t_n$  der Messwertaufnahme berechnet werden.

$$Q(t_n) = V_{ref} \cdot w_0(t_n) \quad (3)$$

#### 3.2 Ergebnisse bei ungestörten Strömungsverhältnissen am Prüfstand

Am Prüfstand werden die instationären Volumenströme durch eine periodische Veränderung des Volumenstromes nachgebildet. Die Abbildung 5 zeigt eine gemessene, ungestörte und unkonditionierte Geschwindigkeitsverteilung bei um 10 % periodisch variierendem Volumenstrom und die zugehörige, mit den Messwerten eines Bezugs-DFS normalisierte Geschwindigkeitsverteilung.

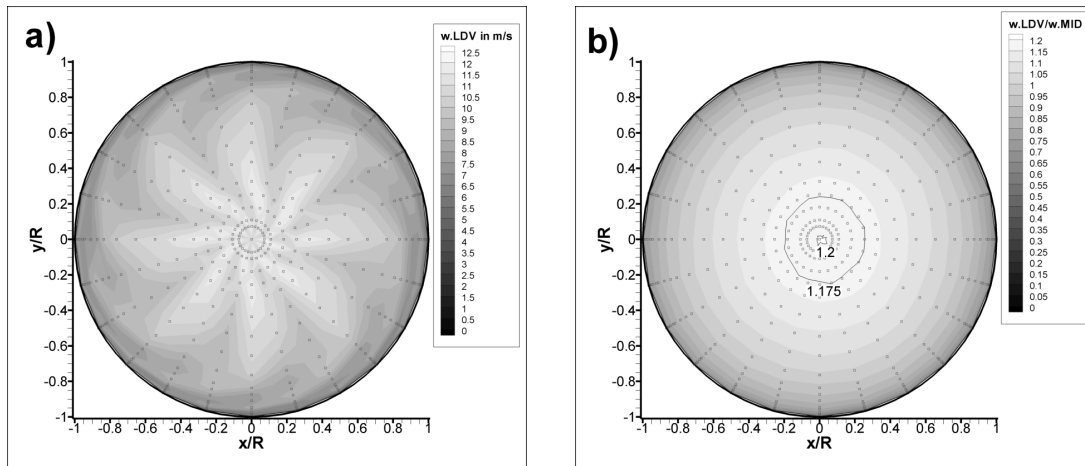


Abbildung 5: Original-Geschwindigkeitsverteilung (a) und mittels Bezugs-DFS normalisierte Verteilung (b) bei periodisch schwankendem Volumenstrom am Prüfstand (Fluidparameter:  $Q = 80 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_W = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Re = 929'000$ ; 409 Messpunkte im Rohrquerschnitt mit  $D = 55,0 \text{ mm}$ )

Für ungestörte Strömungsverhältnisse erfolgten für die Rohrdimensionen DN 50 und DN 80 eine Vielzahl von Messungen mit unterschiedlichen Parametern für die nachgebildeten Instationaritäten. Die ermittelten Abweichungen der gemessenen und berechneten Volumenströme gegenüber den mit den Gebrauchsnormen registrierten Volumenströmen betragen für konditionierte und unkonditionierte Strömungsverhältnisse maximal 0,75 %.

#### 4. Ausblick

Die Messungen am Prüfstand werden für periodische Schwankungen des Volumenstromes bei gestörten Strömungsverhältnissen fortgesetzt. Das Messverfahren wird anschliessend unter praxisnahen Bedingungen an einer Rohrschleife in einem Heizkraftwerk in DN 400 bei Volumenströmen bis  $1'000 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $T_{\text{max}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_{\text{max}} = 25 \text{ bar}$ ) erprobt und optimiert werden.

#### Dankesworte

Wir danken der Fernwärme Wien Ges.m.b.H. für die Unterstützung und Förderung dieses Projektes.

#### Literatur

- [1] Müller, Ulrich; Dues, Michael; Baumann, Henri:  
Erfassung der Geschwindigkeitsverteilungen zur Beurteilung der Empfindlichkeit von Durchfluss-Sensoren.  
Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“ – Beitrag 19.1, 5. – 7. September 2006, Braunschweig.
- [2] Kinghorn, F. C.; Fischl, C. F.:  
The effect of asymmetry on point velocity methods of flow measurement in site of tests of pumps and turbines.  
ISO TC 30/SC3 (UK-20) 86, Juni 1976.
- [3] Salami, L. A.:  
Errors in the velocity-area method of measuring asymmetric flows in circular pipes.  
In Clayton, C. G. (Hrsg.): Modern Development in Flow Measurement (S. 381-400), Peregrinus, London 1972.