

Ultraschall-clamp-on- und LDV-Segmentverfahren

## Möglichkeiten zur Vor-Ort-Überprüfung von großen Durchflusssensoren

Die an Messtellen mit Rohrdimensionen größer DN 200 erfassten Wärmemengen entsprechen einem hohen wirtschaftlichen Wert. Deshalb ist eine hohe Messgenauigkeit sehr wichtig. Häufig sind jedoch große Unterschiede zwischen den Kalibrier- und den individuellen Einsatzbedingungen festzustellen, die die Messeigenschaften der gesamten Messstelle wesentlich beeinflussen. Nachdem die Verfasser in [1] die Notwendigkeit von Vor-Ort-Überprüfungen herausgearbeitet haben, stellen sie im Folgenden die Methoden dazu vor und diskutieren die rechtlichen Rahmenbedingungen.

Die heute einsetzbaren Verfahren zur Vor-Ort-Überprüfung von großen Durchflusssensoren (DFS) unterscheiden sich stark im erforderlichen Aufwand und wesentlich in ihren messtechnischen Eigenschaften voneinander. Häufig wird das Ultraschall-clamp-on-Verfahren eingesetzt, bei dem an der äußeren Rohrwand zwei Ultraschall-Transducer befestigt werden und anschließend eine Laufzeit-Differenz-Messung durchgeführt wird. Geräte mit diesem Messprinzip erreichen unter Referenzbedingungen Messunsicherheiten im Bereich von 1 bis 2 %. In der Praxis bewegen sich die erreichbaren Messunsicherheiten aufgrund der oft nur unzureichend bekannten Rohrgeometrien und den nicht der Kalibrierung entsprechenden Strömungsbedingungen nach Erfahrungen der Verfasser im Bereich von 2 bis 10 % und sind für den Praxisfall nicht rückführbar.

Eher selten wird das von der Überprüfung kleiner DFS bekannte Master-Slave-Verfahren mit Reihenschaltung eines mit Schläuchen in

den Prozess eingeschleiften Vergleichs-DFS (meist nach dem Coriolis-Messprinzip) angewendet. Die Anlagen mit großen Rohrdimensionen sind nicht mit den für dieses Verfahren erforderlichen Absperrvorrichtungen und Anschlüssen versehen, zudem stehen heute nur Coriolis-DFS bis DN 250 zur Verfügung.

Mit den von einigen Herstellern eingesetzten elektronischen Prüf- und Simulationswerkzeugen werden die elektrischen Eigenschaften des Messsystems überprüft; die mindestens genauso wichtige Überprüfung der Strömungseigenschaften am Messort ist hingegen nicht möglich. Somit ist mit diesen Diagnosewerkzeugen keine vollständige Überprüfung der Messunsicherheit des Messsystems im Einbauzustand möglich.

Neuerdings steht auch ein Verfahren unter Nutzung der Laser Doppler Velocimetry (LDV), das LDV-Segmentverfahren, zur Verfügung, mit dem Messunsicherheiten von weniger als 0,6 % (unter Referenzbedingungen) realisiert werden. Auch unter den schwierigeren Praxisbedingungen liegen die Messunsicherheiten im Bereich von 1 bis 3 %.

### LDV-Segmentverfahren

Im Gegensatz zum LDV-Ganzfeldverfahren, bei dem der Einbau einer speziellen Fensterkammer zur Realisierung des vollflächigen optischen Zugangs zur Querschnittsfläche des Rohrs erforderlich ist, wird beim LDV-Segmentverfahren der optische Zugang zu dem Fluid durch mindestens eine ohne Betriebs- und Versorgungsunterbrechung nachträglich in die Rohrleitung einzubringende Zugangskonstruktion ermöglicht. Zur Realisierung der hierfür notwendigen Bohrung in die Rohrleitung ist das bekannte Anbohrverfahren [2], auch unter dem Namen »hot-tapping« bekannt, in Zusammenarbeit mit den Spezialisten des Unternehmens Vattenfall Europe Wärme AG weiterentwickelt worden. Die Strömung im Messquerschnitt wird durch ein ebenfalls unter Druck einsetzbares, konturangepasstes Quarzglasfenster nicht beeinflusst. Nachdem der optische Zugang geschaffen worden ist, werden mit einem LDV-Messsystem die Fluid-Geschwindigkeiten entlang eines Durchmesserpfads durch automatische Traversierung der LDV-Sonde außerhalb der Rohrleitung örtlich hochaufgelöst gemessen (Bild 1).

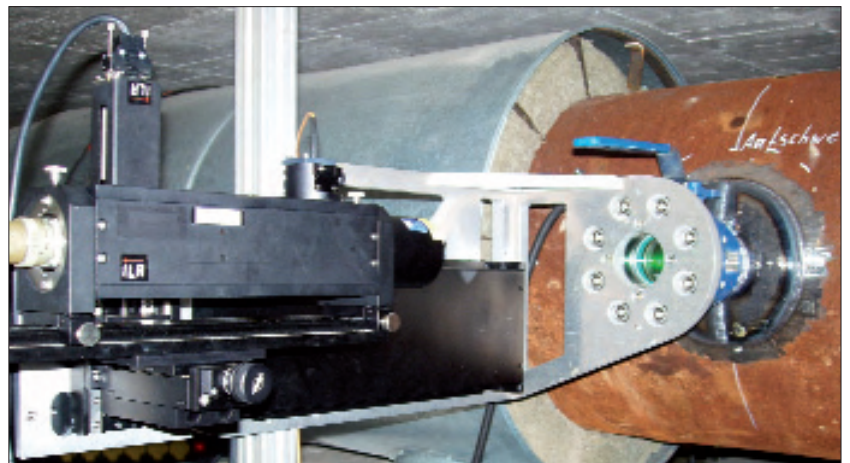


Bild 1. Realisierung des LDV-Segmentverfahrens

Dr.-Ing. **Ulrich Müller**, Geschäftsführer, Optolution GmbH, Reinach/Schweiz, Univ.-Prof. DDr. **Franz Adunka**, Consultant, Maria Wörth/Österreich, Dr.-Ing. **Michael Dues**, Geschäftsführer, Intelligent Laser Applications (ILA) GmbH, Jülich, Dr.-Ing. **Peter Guntermann**, Prokurist, TÜV Rheinland Insitu Calibration GmbH, Köln, Dr. **Jürgen Rose**, Arbeitsgruppenleiter 7.61, und Dr. **Thomas Lederer**, Fachbereichsleiter 7.6, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin

Der Volumenstrom kann dann durch Integration der gemessenen Geschwindigkeitsprofile berechnet werden. Nach vorgenommener Messung wird das äußere Schauglas entfernt und die Messstelle mit einem Blindflansch bis zur nächsten periodischen Wiederholungsmessung verschlossen.

Aufgrund des nur beschränkten optischen Zugangs können Messungen der lokalen Geschwindigkeit nur entlang von einem (oder bei mehreren Anbohrungen auch entlang mehrerer) Durchmesserpfad(e) realisiert werden. Somit ist bei zur Rohrachse unsymmetrischen Geschwindigkeitsverteilungen im Messquerschnitt mit einer erhöhten Messunsicherheit zu rechnen. In diesen Fällen ist es sinnvoll, weitere Anbohrungen unter charakteristischen Winkeln (so weit dies die Platzverhältnisse vor Ort zulassen) vorzunehmen und zusätzliche Informationen zur Strömungscharakteristik (u. a. aus den Installationsbedingungen und darauf basierender CFD-Simulationen der Geschwindigkeitsverteilungen) zu nutzen.

Die anlagenbedingten Veränderungen des Durchflusses während der Messzeit werden durch Normalisierung der LDV-Messwerte mit den durchflussproportionalen Signalen des Prüflings berücksichtigt. Das hierzu erforderliche lineare Verhalten des Prüflings ist im Bereich von rd. 30 % um den jeweiligen Prüfpunkt gegeben. Zur Erfassung der Rohrgeometrie stehen die ausgebohrte Rohrrunde sowie optische und konventionelle Messverfahren zur Verfügung.

Die Messunsicherheit des LDV-Segmentverfahrens wurde im Rahmen eines PTB-Prüfberichts [3] detailliert untersucht. Die insgesamt über vierzig Einflussfaktoren wurden hierzu neun Haupteinflussgruppen zugeordnet (*Bild 2*). Die bestätigte Messunsicherheit von weniger als 0,6 % für einen instationären Fluidzustand und symmetrische Strömungsverhältnisse steht in sehr guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Vergleichsmessungen am Großwärme-Prüfstand der PTB Berlin [3].

Die bisherigen Überprüfungen von großen DFS im Einbauzustand mit dem LDV-Segmentverfahren decken einen Nennweitenbereich von DN 200 bis DN 600 bei Fluidtemperaturen bis 120 °C ab. Die Er-

gebnisse der Überprüfung von mehr als zwanzig Messstellen zeigen maximale Abweichungen bis zum Vierfachen der mit den konventionellen DFS gemessenen Volumenströme und demonstrieren somit eindrücklich die Notwendigkeit von Vor-Ort-Überprüfungen.

### Vergleich von Ultraschall-clamp-on- und LDV-Segmentverfahren

Das Ultraschall-clamp-on-Verfahren und das LDV-Segmentverfahren unterscheiden sich vor allem bezüglich der realisierbaren Messunsicherheiten und dem erforderlichen Aufwand bei der Durchführung der Vor-Ort-Messungen voneinander.

Die wesentliche Ursache für die gegenüber dem LDV-Segmentverfahren größeren Messunsicherheiten des Ultraschall-clamp-on-Verfahrens liegt in den verwendeten physikalischen Messprinzipien begründet. Beim Ultraschall-clamp-on-Verfahren wird mit der Laufzeitdifferenz die integrale Geschwindigkeit über den Messpfad gemessen und mit den unter Referenzbedingungen ermittelten Kalibrierwerten verrechnet. Es liegen keine Informationen über die Geschwindigkeitsverteilung im Messquerschnitt vor. Beim LDV-Segmentverfahren werden hingegen die lokalen Geschwindigkeiten an vielen Punkten entlang eines oder mehrerer Durchmesserpfade gemessen. Somit sind die Informationen über die Geschwindigkeitsverteilung im Messquerschnitt in Form eines Profils vorhanden und können bei der Berechnung des Volumenstroms berücksichtigt werden. Darüber hinaus weist die LDV-Methode als Fundamentalverfahren eine ausgezeichnete Langzeitstabilität auf.

Für die Realisierung des Ultraschall-clamp-on-Verfahrens sind neben der Entisolierung der Messstelle nahezu keine vorbereitenden Arbeiten notwendig. Das LDV-Segmentverfahren erfordert die einmalige Schaffung des optischen Zugangs, für Wiederholungsmessungen entfällt dann jedoch dieser Aufwand. Die Dauer der Durchführung einer Messung mit dem LDV-Segmentverfahren bewegt sich in der Größenordnung von ein bis zwei Stunden und ist damit länger als die für eine Betriebspunktmessung mit dem Ultraschall-clamp-on-Verfahren benötigte Zeit.

Aus den unterschiedlichen Eigenschaften der beiden Messverfahren ergeben sich die verschiedenen Einsatzschwerpunkte. Das Ultraschall-clamp-on-Verfahren eignet sich hauptsächlich für Monitoring- und Plausibilitätsuntersuchungen sowie dauerhafte (fest installierte) Messungen. Der Einsatzschwerpunkt des LDV-Segmentverfahrens liegt hingegen bei der rückgeführten Überprüfung und Kalibrierung von wirtschaftlich bedeutsamen Messstellen mit den entsprechenden Zertifikaten. Derzeit wird das LDV-Segmentverfahren für den Einsatz auch bei nichtsymmetrischen Geschwindigkeitsverteilungen im Messquerschnitt weiterentwickelt.

### Rechtliche Situation für Vor-Ort-Kalibrierungen

Mit dem LDV-Segmentverfahren eröffnet sich erstmals die Möglichkeit, Kalibrierungen und eichtechnische Prüfungen von DFS am Einbauort durchzuführen. Bisher waren Eichungen (bzw. Konformitätsbewertungen) und Nacheichungen am Einbauort zwar nicht prinzipiell ausgeschlossen, aber wegen der geforderten Messunsicherheiten eines dazu benötigten Referenznormals von einem Fünftel der Eichfehlergrenzen und fehlender Rechtsvorschriften vor allem bezüglich der Prüfbedingungen praktisch nicht realisierbar.

Grundsätzlich muss hinterfragt werden, ob die Forderung der fünf-fach geringeren Messunsicherheit des Referenznormals für Kalibrierungen unter Betriebsbedingungen sinnvoll ist. Eine Alternative wäre die Reduzierung der Anforderungen auf ein Drittel der Eichfehlergrenzen, da die sonst notwendige Sicherstellung der Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Prüfstand zum Einbauort wegfällt. Selbstverständlich muss für die Durchführung von Vor-Ort-Kalibrierungen die Kompetenz gemäß ISO 17025 [4], z. B. im Rahmen einer Akkreditierung durch die Deutsche Akkreditierungsstelle DAkkS, nachgewiesen werden.

Dem Einwand, dass am Aufstellungsort eines DFS nicht der ganze Messbereich des Zählers von  $q_i \leq q \leq q_p$  eichtechnisch geprüft werden kann, muss entgegnet werden, dass die Festlegung des Messbereichs entsprechend den tatsäch-

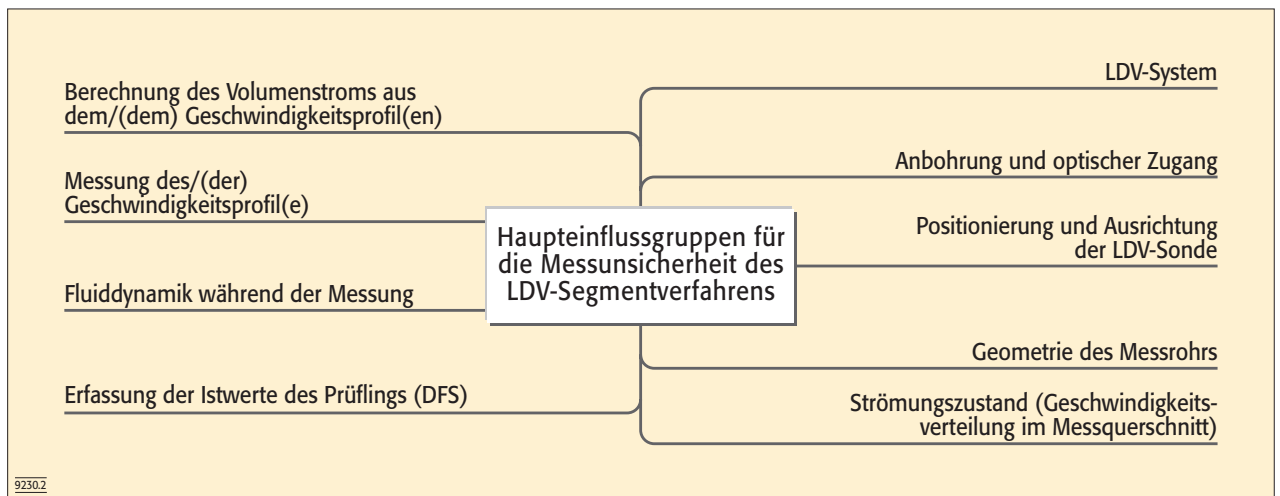


Bild 2. Haupteinflussgruppen für die Messunsicherheit des LDV-Segmentverfahrens [2]

lichen Durchflüssen vor Ort dem Grundgedanken der Sicherstellung der Messgerechtigkeit zumindest genauso entspricht wie das bisherige Vorgehen.

Der weitere Einwand, dass in Messanlagen keine konstanten Fluidbedingungen herrschen – sowohl hinsichtlich des Durchflusses als auch der Temperatur und des Drucks des Wärmeträgers –, spricht eigentlich für das LDV-Segmentverfahren. Der zu kalibrierende DFS wird genau unter jenen Bedingungen kalibriert, unter denen er tatsächlich eingesetzt wird. Ist er gegenüber dynamischen Prozessen empfindlich, fällt dies nur bei der Kalibrierung vor Ort auf.

Ein gewisses Problem ist naturgemäß die Tatsache, dass die anlässlich einer Kalibrierung oder eichtechnischen Prüfung notwendigen Parameter (Durchfluss, Temperatur und Druck) während den Vor-Ort-Prüfungen nur bedingt konstant gehalten werden können. Hier hilft bei dem LDV-Segmentverfahren die erwähnte Normalisierung der Messwerte mit den durchflussproportionalen Werten des Prüflings. Die Fluidtemperatur ändert sich in der Praxis oft nur in größeren Zeiträumen, zudem kann die Temperatur parallel gemessen und berücksichtigt werden. Gegenüber den in Fernwärmanlagen auftretenden Druckveränderungen ist das LDV-Segmentverfahren unempfindlich.

Bezüglich der Ausreizung des Temperaturspektrums kann argumentiert werden, dass auch auf einem Prüfstand meist nur eine Wassertemperatur vorgegeben wird. In vielen Fällen, so zeigt die gängige Pra-

xis, werden Kalibrierungen von DFS von Wärmezählern statt mit Warm- oder Heißwasser sogar nur mit Kaltwasser ( $\leq 25\text{ °C}$ ) vorgenommen.

Aus den genannten Überlegungen heraus erscheint eine baldige Klärung der gesetzlichen Rahmenbedingungen für Vor-Ort-Kalibrierungen von großen DFS als unbedingt notwendig. Hierzu angelaufene Felduntersuchungen in Zusammenarbeit mit Eichaufsichtsbehörden zielen im ersten Schritt auf die technische Absicherung angestrebter Vor-Ort-Befundprüfungen im Sinn einer Vorprüfung ab, die mittelfristig – vergleichbar mit der Entwicklung der TR W 19, Anhänge D1 bis D3 »Ergänzende Prüfung eines Wasserzählers vor Ort« [5] – auch ihren entsprechenden Niederschlag in der Erweiterung der TR K 19 finden sollen [6]. Es ist dann von der Entscheidung des Gesetzgebers abhängig, ob das LDV-Segmentverfahren zur Kalibrierung und Eichung von eingebauten DFS eingesetzt werden kann.

Ebenfalls mittelfristig sollte die vom Gesetzgeber zugelassene Ausnahme von der Eichpflicht für Wärmezähler mit thermischen Leistungen ab 10 MW [7] neu beurteilt, unter Umständen gestrichen werden, ebenfalls unter der Zielrichtung einer staatlich kontrollierten technischen Absicherung der Messgerechtigkeit. Die Entscheidung darüber hat der Gesetzgeber zu treffen. Ein Konsens aller beteiligten Vertragspartner, Interessenvertretungen sowie der zuständigen Bundes- und Landesbehörden würde die rechtliche Umsetzung beschleunigen.

## Zusammenfassung

Die unterschiedlichen Bedingungen bei der Kalibrierung großer DFS auf Prüfständen und im Einbauzustand können zu wirtschaftlich relevanten Messabweichungen führen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Durchführung von Vor-Ort-Überprüfungen für große DFS. Derzeit stehen im Wesentlichen zwei Verfahren für Vor-Ort-Messungen zur Verfügung. Während sich das Ultraschall-clamp-on Verfahren vor allem für Monitoring- und Plausibilitätszwecke eignet, liegt der Einsatzschwerpunkt des genaueren LDV-Segmentverfahrens bei der Überprüfung von DFS großer Wärme- (oder auch Kaltwasser-)Messstellen. Die Erfahrungen mit dem LDV-Segmentverfahren demonstrieren nachdrücklich die Bedeutung und die Notwendigkeit der Durchführung von Vor-Ort-Überprüfungen.

Das LDV-Segmentverfahren hat das Potenzial für die Realisierung von Vor-Ort-Kalibrierungen und eichtechnischen Prüfungen am Einbauort großer DFS. Derzeit sind jedoch die rechtlichen Rahmenbedingungen hierfür noch nicht ausreichend gegeben.

## Danksagung

Im Verlaufe der Messungen an der Versuchsanlage im Heizkraftwerk Kagran der Fernwärme Wien in den Jahren 2008 bis 2010 konnten viele Erfahrungen gewonnen werden, die in die Entwicklung des Segmentverfahrens eingeflossen sind. Michael Utz und Reinhard Scheifler haben

sich in diesem Sinne um die Realisierung der ersten LDV-Dauermessungen in einem Fernwärmenetz sehr verdient gemacht.

Die Verfasser bedanken sich bei jenen Fernwärmeversorgern, z. B. Vattenfall Europe Wärme, und -verbrauchern, die sich gegenüber dem neuen LDV-Segmentverfahren bereits aufgeschlossen gezeigt haben und in deren Netzen Messungen mit diesem Verfahren vorgenommen wurden.

Die Entwicklung des LDV-Segmentverfahrens geschah in enger Zusammenarbeit der Unternehmen Intelligent Laser Applications GmbH, Jülich, und Optolution GmbH, Reinach/Schweiz, mit der PTB, Fachbereich Wärme, und dem metrologischen Staatsinstitut der Schweiz (Metas). Das Projekt wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die sicherheitstechnische Prüfung des Verfahrens wurde durch den TÜV Rheinland vorgenommen, der auch den Service der Vor-Ort-Kalibrierung im Bereich der Fernwärme übernehmen wird.

## Literatur

[1] Müller, U.; Adunka, F.; Dues, M.; Guntermann, P.; Rose, J.; Lederer, Th.: Notwendigkeiten der Vor-Ort-Überprüfung von

großen Durchfluss-Sensoren. In *EuroHeat&Power* Jg. 40 (2011), H. 6, S. 48 – 52.

[2] AGFW-Arbeitsblatt FW 432: Betriebliche Mindestanforderungen an die Erstellung eines Rohrabzweiges an in Betrieb befindlichen Fernwärmeleitungen nach dem Anbohrverfahren. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme, Frankfurt am Main, 2006.

[3] PTB, Fachbereich Wärme: LDV Volumenstrommessung mit Anbohrverfahren DN 200 (laseroptisches Verfahren zur Ermittlung des Volumenstromes, hydraulisch entwickeltes Strömungsprofil). Auftraggeber ILA GmbH und Optolution GmbH, PTB-Prüfzeichen 7.6-1.1-10-16, Februar 2011.

[4] ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien. 08/2005, Berichtigung vom Mai 2007.

[5] Messgeräte für Wasser – Technische Richtlinie der PTB im Einvernehmen mit den Eichaufsichtsbehörden, Nr. W 19. Ausgabe 11/2007.

[6] Messgeräte für thermische Energie – Technische Richtlinie der PTB im Einvernehmen mit den Eichaufsichtsbehörden, Nr. K 19. Ausgabe 11/2008.

[7] Müller, U.; Dues, M.: Abschlussbericht Phase 1 des Projektes »Einsatz der LDV zur

Volumenstrom-Messung unter Betriebsbedingungen an der Versuchsanlage im HKW Kagran der Fernwärme Wien«. Fernwärme Wien, Optolution GmbH, ILA GmbH, Oktober 2010.

[8] Guntermann, P.; Rose, J., Lederer, Th.; Dues, M., Müller, U.; Duckwe, A.: Vorort-Untersuchung von Wärmemengenzählern im Betrieb. In *EuroHeat&Power* Jg. 39 (2010), H. 6, S. 44 – 47. ■

[peter.guntermann@de.tuv.com](mailto:peter.guntermann@de.tuv.com)

[www.tuv.com/tric](http://www.tuv.com/tric)