

Messunterschiede im Prüfstand und im Einsatz

Notwendigkeiten der Vor-Ort-Überprüfung von großen Durchfluss-Sensoren

Bei Durchfluss-Sensoren größer DN 200 sind häufig große Unterschiede zwischen den Kalibrier- und den individuellen Einsatzbedingungen festzustellen, die die Messeigenschaften der gesamten Messstelle wesentlich beeinflussen. Diese Messabweichungen können zu erheblichen wirtschaftlichen Schäden führen. Die Verfasser diskutieren die bisherige Vorgehensweise bei der Kalibrierung bzw. eichtechnischen Prüfung von großen Durchfluss-Sensoren und arbeiten die Notwendigkeit von Vor-Ort-Überprüfungen heraus.

Trotz der wachsenden Sensibilisierung bezüglich der gesamten Energie- und Ressourcenproblematik wird derzeit noch oft die Bedeutung der Messrichtigkeit von großen Wärme- bzw. Kältemessstellen¹⁾ unterschätzt. Die an Messstellen mit Rohrdimensionen ab rd. DN 200 erfassten Wärmemengen entsprechen einem hohen wirtschaftlichen Wert. Messabweichungen von wenigen Promillen können bereits zu beträchtlichen ökonomischen Konsequenzen und hohen Streitwerten führen. Daher ist eine geringe Messunsicherheit und eine hohe Messstabilität derartiger Messstellen aus folgenden Gründen wichtig:

- Sicherstellung der Messgerechtigkeit zwischen den Abrechnungspartnern,
- Optimierung des Netz- und Energiemanagements und
- Vermeidung von wirtschaftlichen Verlusten.

Die Messcharakteristik der Messstellen wird durch die unterschiedlichen Bedingungen am Ort der Kalibrierung bzw. Eichung (dem Prüf-

stand) und am Einbauort sowie durch zeitliche Effekte beeinflusst. Somit kann auch bei einer geeichten Messstelle eine Veränderung der Messstabilität während der fünfjährigen Eichgültigkeitsdauer nicht ausgeschlossen werden. Fehlerhafte Abrechnungen infolge erkannter Messabweichungen können gemäß der AvBFernwärmeV [1] jedoch nur rückwirkend für eine Periode von zwei Jahren geltend gemacht werden.

Vor allem für Durchfluss-Sensoren²⁾ (DFS) größer DN 200 verdient die Gewährleistung der erforderlichen Messrichtigkeit und Messbeständigkeit erhöhte Aufmerksamkeit, da bei ihnen häufig große Unterschiede zwischen den Kalibrier- und den stets individuellen Einsatzbedingungen festzustellen sind und diese die Messeigenschaften der gesamten Messstelle wesentlich beeinflussen.

Trotz der ständigen Optimierung der DFS und der Prüfstände bleibt das prinzipielle Problem des Einflusses von unterschiedlichen Kalibrier- und Einsatzbedingungen auf die Messcharakteristik der DFS bestehen. Der konsequenteste Lösungsansatz für diese Problematik ist die Überprüfung und gegebenenfalls Kalibrierung der DFS am Einbauort (bzw. Vor-Ort oder in situ) unter Einbeziehung der tatsächlichen Betriebsbedingungen. Für diese Aufgabe standen bisher nur Ultraschall-clamp-on-Messgeräte mit ihren eingeschränkten Möglichkeiten zur Verfügung. Neu ist nun ein Verfahren auf der Grundla-

ge der Laser Doppler Velocimetry (LDV), das LDV-Segmentverfahren, für die umfassende Lösung dieser Aufgabe verfügbar.

Im Folgenden wird die bisherige Vorgehensweise bei der Kalibrierung bzw. eichtechnischen Prüfung von großen DFS diskutiert und die Notwendigkeit von Vor-Ort-Überprüfungen herausgearbeitet.

Notwendigkeiten der Vor-Ort-Überprüfung von großen DFS

Kalibrierung von DFS auf Prüfständen

Die Bedingungen auf den zur Kalibrierung von DFS eingesetzten Prüfständen sind gekennzeichnet durch:

- hydraulisch vollausgebildete, turbulenzarme und drallfreie Geschwindigkeitsverteilungen (gemäß EN 1434-4 [2]),
- konstante Durchflüsse an den einzelnen Prüfpunkten (maximale Schwankungen von $\pm 5\%$ gemäß [3]),
- konstante Fluidtemperaturen bei den Prüfungen (maximale Schwankungen von $\pm 5\text{ K}$ gemäß [3]) sowie
- konstante und bekannte Umgebungsbedingungen, z. B. bezüglich Temperatur und Elektromagnetische-Verträglichkeit-(EMV-)Verhältnissen.

Nur bei Einhaltung dieser Anforderungen ist die Vergleichbarkeit der auf unterschiedlichen Prüfständen gewonnenen Kalibrierergebnisse gegeben. Eigentlich könnten diese Prüfbedingungen als ideal angesehen werden. In Wahrheit wären sie jedoch nur dann ideal, wenn sie den späteren Einsatzbedingungen der DFS wirklich in jeder Hinsicht entsprechen würden.

Bei DFS großer Nennweite wird heute fast ausschließlich nur eine Kalibrierkonstante für den gesamten Dynamikbereich im Gerät hinterlegt. Bei den häufig vorkommenden unterschiedlichen Messabweichungen an den verschiedenen Durchfluss-Prüfpunkten (vor allem bei den niedrigen Durchflüssen) wird somit die Messunsicherheit der Kalibrierung für die einzelnen

1) In den folgenden Ausführungen schließt der Begriff Wärme auch die umgangssprachlich als Kälte bezeichnete »Wärme auf niedrigem Temperaturniveau« ein.
2) Die Bezeichnung Durchfluss-Sensor umfasst gemäß der EN 1434-1 [2] das komplette aus Messaufnehmer und Messumformer bestehende Durchfluss-Messsystem.

Dr.-Ing. **Ulrich Müller**, Geschäftsführer, Optolution GmbH, Reinach/Schweiz, Univ.-Prof. Dr. **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

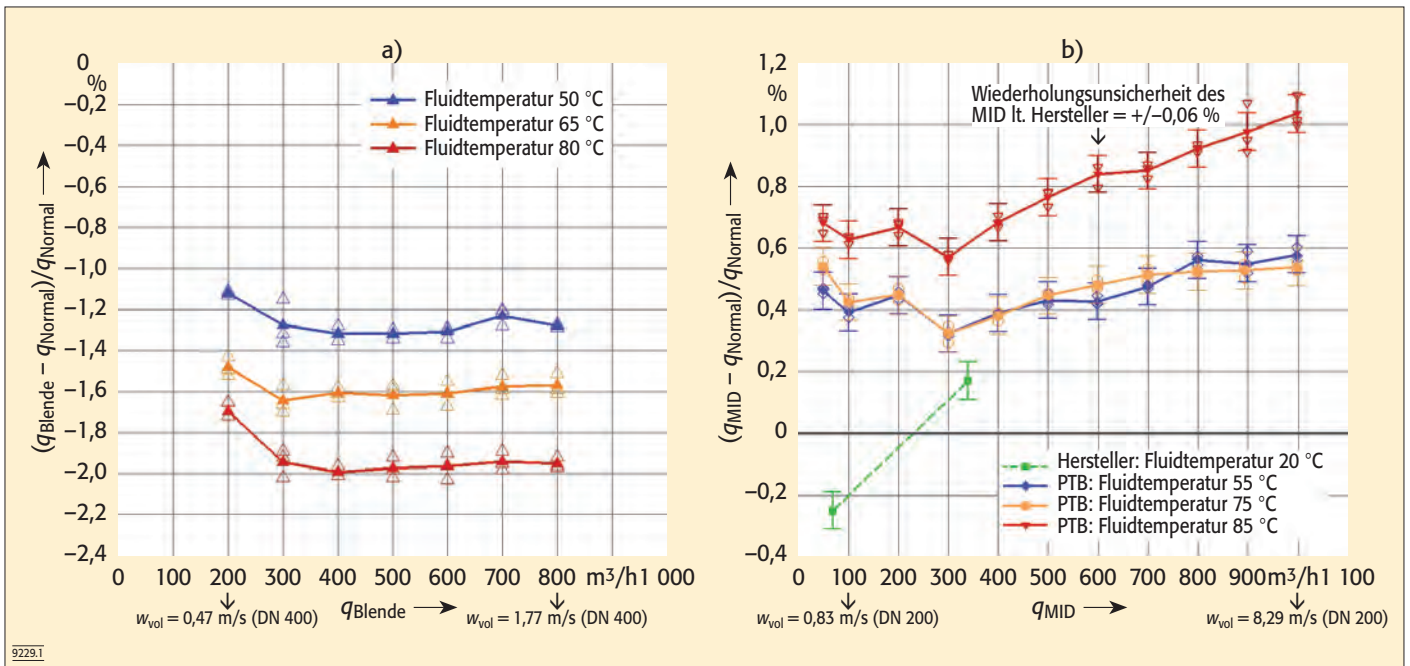


Bild 1. Ergebnisse von Kalibrierungen einer neuwertigen Blende DN 400 (a) und eines neuwertigen MID DN 200 (b) auf dem Großwärme-Prüfstand der PTB Berlin [5]

Prüfpunkte nachträglich vergrößert.

Große DFS nach dem Staudruck- oder Wirkdruckverfahren werden nach der entsprechenden Norm EN ISO 5167 [4] ausgelegt und gefertigt, eine Kalibrierung auf einem Prüfstand mit Wasser unterbleibt jedoch oft. Die Messstabilität von Wirkdruckmessgeräten ist entscheidend von der Kantenschärfe der Blenden abhängig, die sich jedoch während des oft jahrzehntelangen Einsatzes dieser DFS durch Abrasionen oft unbemerkt verschlechtert und zu einer tendenziellen Veränderung der Messabweichungen in negative Richtung (Mindermessung) führt.

Bei DFS mit Nennweiten größer als DN 200 ist heute i. d. R. eine Kalibrierung mit Warmwasser nicht möglich, da nahezu alle Prüfstände für diese Rohrdimensionen (mit Ausnahme z. B. des Großwärme-Prüfstands der PTB Berlin, Fachbereich Wärme) nur mit Kaltwasser betrieben werden. DFS weisen abhängig vom Messprinzip, von der Bauart sowie vom Hersteller eine mehr oder weniger ausgeprägte Abhängigkeit der Messcharakteristik von der Fluidtemperatur auf. Bild 1 zeigt die Ergebnisse von Kalibrierungen von zwei Neugeräten (Blende und magnetisch-induktives Durchflussmessgerät (MID)) für typische in Fernwärmeleitungen auftretende Temperaturen. Die Abwei-

chungen betragen bei einer Temperaturdifferenz von lediglich 30 K im Mittel rd. 0,35 % und 0,50 %.

Für einige zur Eichung zugelassene große DFS sind nach Eignungsprüfungen auch Eichungen mit

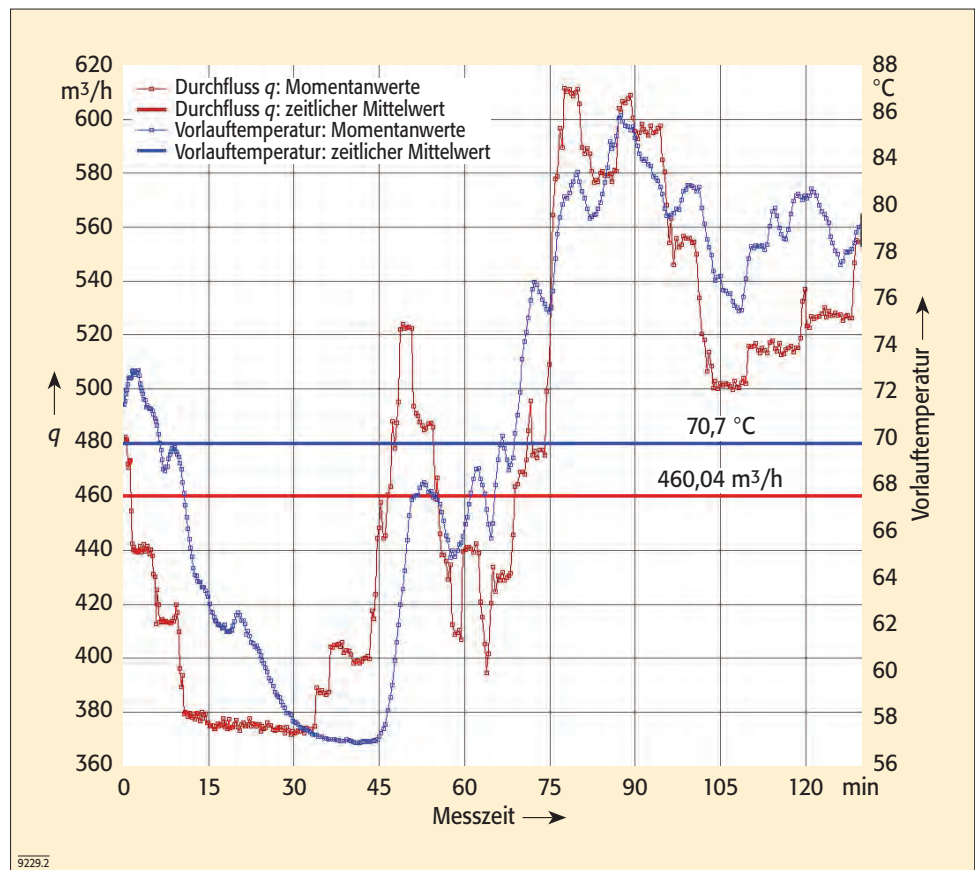


Bild 2. Typisches dynamisches Verhalten in einem Fernwärmenetz (aus [6])

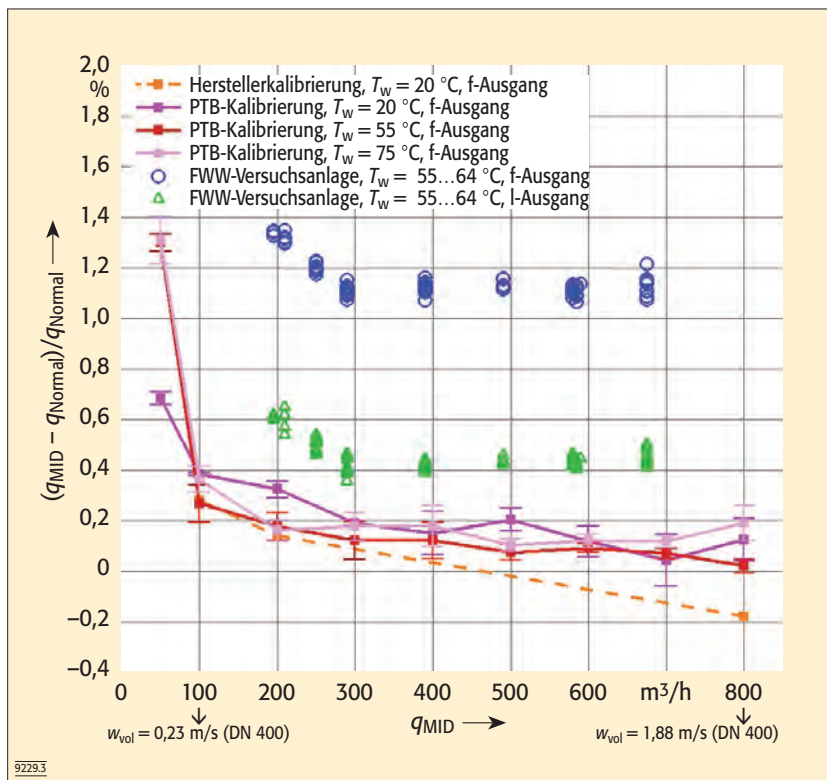


Bild 3. Einfluss der Verwendung von unterschiedlichen Signalausgängen auf die Messabweichungen eines DFS (aus [6])

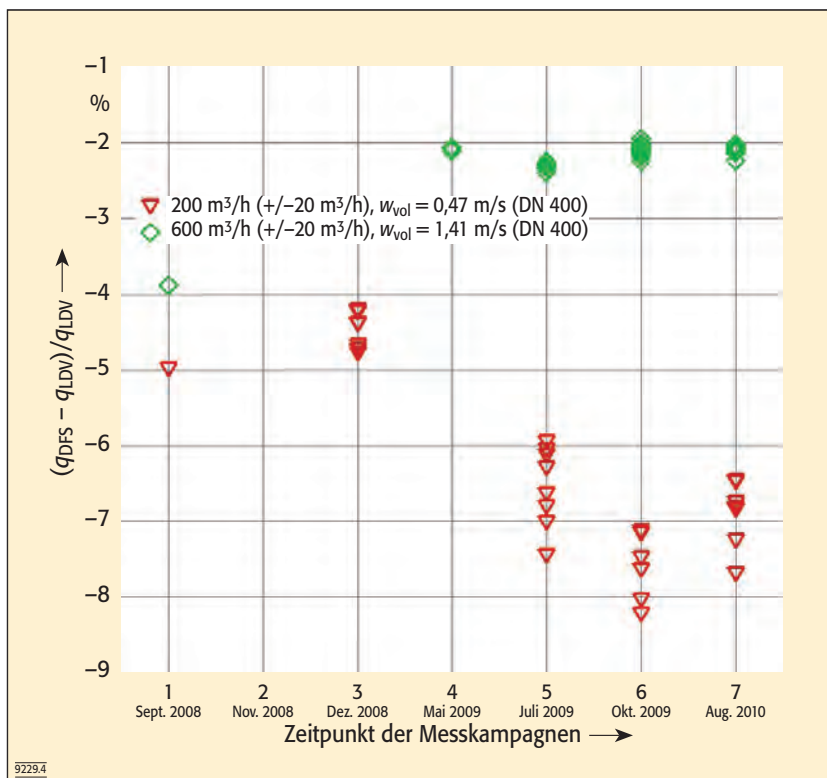


Bild 4. Veränderungen der Messabweichungen eines DFS DN 400 nach dem Staudruck-Messprinzip während einer Einsatzzeit von rd. zwei Jahren (aus [6])

Kaltwasser zulässig. Derartige Geräte stellen jedoch nur eine Minderheit der im Feld eingesetzten großen DFS zur Wärmemessung dar. Die Hauptursache hierfür liegt in der Ausnahmeregelung für Messstellen zum Austausch thermischer Energie mit Nennleistungen von mindestens 10 MW gemäß [6], die diese Messstellen von der Eichpflicht ausnimmt. Die wesentlichen Gründe für diese Ausnahmeregelung des Gesetzgebers [6] waren die erwähnte beschränkte Verfügbarkeit von geeigneten Prüfständen und eine vorausgesetzte technische Kompetenz der Abrechnungspartner.

Einbaubedingungen kalibrierter DFS

Die Kalibrierung am Prüfstand ist nur beschränkt aussagefähig für das Verhalten des DFS am tatsächlichen Einbauort im Anlagennetz. So herrschen dort selten

- die definierten hydraulischen Strömungsbedingungen der Kalibrierung, da die strömungstechnischen Verhältnisse in der Anlage i. d. R. nicht bekannt sind,
- die konstanten Durchflüsse der Kalibrierung,
- die Durchflüsse, bei denen der DFS auf dem Prüfstand kalibriert wurde (Prüfpunkte),
- die konstanten Wärmeträger-Temperaturen der Kalibrierung,
- die Wärmeträger-Temperaturen bei der Kalibrierung sowie
- die definierten Umgebungsbedingungen der Kalibrierung.

Im Folgenden werden die Ursachen dieser Problematik – die stets individuellen Einbaubedingungen der DFS – näher diskutiert.

Die Strömungsverhältnisse am Einbauort der DFS können trotz der von den Herstellern geforderten geraden, ungestörten Einlaufstrecken u. a. durch eine anlagenbedingte Nichteinhaltung, durch in das Fluid hineinragende Dichtungen sowie durch nichtfluchtende Flansche wesentlich beeinflusst werden. Selbst bei Einhaltung der von den Herstellern spezifizierten Einbaubedingungen der DFS müssen die tatsächlichen Verhältnisse bedingt durch die oft komplexen Anlagengeometrien vor der Messstelle und der nicht trivial vorhersagbaren Strömungsphysik nicht zwingend den geforderten Strömungsverhältnissen am Einbauort entsprechen.³⁾ Ein bereits in der Rohr-

leitung vor dem DFS vorhandener Drall kann selten im Verlauf der angegebenen Einlaufstrecken abgebaut werden.

Der Dynamikbereich der Anlage bezüglich des Durchflusses kann vom Kalibrierbereich $q_i \leq q \leq q_p$ des DFS abweichen. Vor allem bei Unterschreitung des Kalibrierbereichs werden erhebliche zusätzliche Messunsicherheiten verursacht, da die physikalisch bedingte Messunsicherheit der Geräte in diesem Bereich stark steigt. In den Fernwärmenetzen liegen in-stationäre Zustände bezüglich aller Fluidparameter vor. Bild 2 zeigt den zeitlichen Verlauf von Durchfluss und Vorlauftemperatur in einem Fernwärmenetz. Es ist zu erkennen, dass die Temperaturen und Durchflüsse starken, auch kurzfristigen Schwankungen unterliegen. Es treten deutliche Änderungen im Minutenbereich auf. Inwiefern die DFS diesen hohen Dynamiken folgen können, wird i. d. R. weder bei der Konformitätsbewertung noch bei der Kalibrierung am Prüfstand untersucht.

Wird am Einbauort des DFS ein anderer Signalausgang, z. B. der digitale Impuls- oder Frequenzausgang, als bei der Kalibrierung am Prüfstand, z. B. der Analogausgang, verwendet, können zusätzliche Messabweichungen in der Größenordnung von 0,1 bis 0,5 % entstehen.

Besonders problematisch sind eventuelle Auswirkungen von EMV-Einflüssen am Einbauort auf die Messcharakteristik des DFS, da sie nur sehr schwer erkannt werden können. Bild 3 zeigt für einen realen Fall die Abweichungen zwischen den Werten des Strom- und des Frequenzausgangs bedingt durch EMV-Einstreuungen (hier rd. 0,7 %). Eine Ursache für die teilweise höhere Empfindlichkeit von großen DFS gegenüber EMV-Einflüssen dürfte darin begründet sein, dass EMV-Prüfungen, z. B. während der Konformitätsbewertungen, unter Betriebsbedingungen bei diesen Geräten nur mit hohem Aufwand durchzuführen sind und daher oft auf die Ergebnisse der Prüfungen von DFS kleinerer Nennweiten der

3) DFS nach dem volumetrischen Messprinzip und dem Coriolis-Messprinzip sind physikalisch bedingt bedeutend unempfindlicher gegenüber den Strömungsverhältnissen am Einbauort, als die für die Messung großer Wärmemengen häufig eingesetzten Inline-Ultraschall- und magnetisch-induktiven DFS.

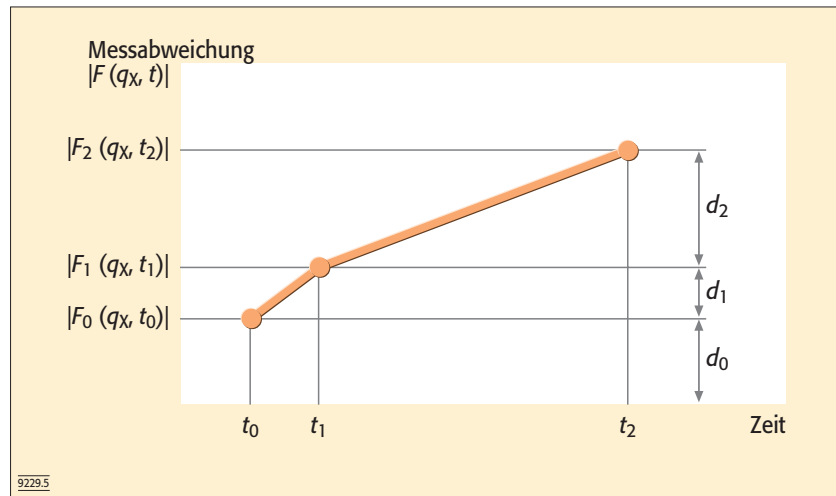


Bild 5. Zeitliche Veränderung der Fehlerkurve am Beispiel der Veränderung der Messstabilität eines DFS beim Durchfluss q_x innerhalb des Kalibrierbereichs; Anmerkungen: t_0 ist der Zeitpunkt der Kalibrierung des DFS am Kalibrierstand, t_1 entspricht dem Zeitpunkt des Einbaus des DFS in die Anlage, t_2 ist der Zeitpunkt z. B. nach einer gewissen Einsatzzeit des DFS (z. B. nach Ablauf einer Eichgültigkeitsdauer)

gleichen Baureihe zurückgegriffen wird.

Extreme Umgebungseinflüsse, wie sie z. B. beim Schweißen an der Rohrleitung in unmittelbarer Nähe des DFS auftreten, können nach konkreten Erfahrungen der Verfasser zu weiteren unbemerkten und wesentlichen Verfälschungen der Messwerte führen.

Während der Einsatzdauer der DFS kann sich u. a. durch mechanische und elektrische Einflüsse die Messcharakteristik unbemerkt verändern. Bild 4 zeigt die Veränderungen der Messabweichungen eines DFS (DN 400) nach dem Staudruckmessprinzip während einer vergleichbar kurzen Einsatzdauer von rd. zwei Jahren. Die Veränderungen bei einem Durchfluss von $200 \text{ m}^3/\text{h}$ (dieser Betriebspunkt liegt trotz der geringen volumetrischen Ge-

schwindigkeit von $w_{\text{vol}} = 0,47 \text{ m/s}$ noch innerhalb der Spezifikationsangaben des Herstellers) betragen bis rd. -4 %.

Weitere genauigkeitsmindernde Einflüsse sind beim Transport des DFS vom Prüfstand zur Messstelle durch unsachgemäßen Umgang möglich. So bietet selbst eine geeichte Messstelle nicht die letzte Sicherheit einer exakten Messung, da vor allem während des Einbaus und des Anschlusses des Messsystems menschlich bedingte Fehler auftreten können. Die Verfasser haben derartig bedingte Abweichungen von mehr als 50 % festgestellt.

Die von Wärmekunden beantragten Befundprüfungen von DFS zeigen auf Prüfständen oft keine größeren Messabweichungen, im Regelfall werden die Verkehrsfehlergrenzen eingehalten. Einer der

Formelzeichen

d_0	am Prüfstand festgestellte Messunsicherheit des DFS
d_1	Messabweichung des DFS zwischen Prüfstand und Einbaustelle
d_2	Messabweichung des DFS nach einer gewissen Einbauzeit
F	relative Messabweichung des DFS
q	Volumendurchfluss
q_i	minimaler Durchfluss innerhalb des Kalibrierbereichs
q_p	permanentener Durchfluss bzw. Dauerdurchfluss
t	Zeit
t_0	Zeitpunkt der Kalibrierung des DFS am Prüfstand
t_1	Zeitpunkt des Einbaus des DFS am Messort
t_2	Zeitpunkt nach einer gewissen Einsatzdauer des DFS am Messort
w_{vol}	volumetrische Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung

Gründe hierfür können die auf dem Prüfstand nicht reproduzierbaren Einbaubedingungen der DFS sein. Die Kosten für negative Befundprüfungen muss der Antragsteller, hier also der Wärmekunde, tragen.

Bei einer salzarmen Fahrweise des Netzes kann die für MID erforderliche minimale elektrische Leitfähigkeit unterschritten werden. Dies kann zu erhöhtem elektronischen Rauschen und einer Vergrößerung der Messunsicherheit der MID führen. Hier ist der Einsatz eines alternativen Messverfahrens erforderlich.

Zusammenfassung

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass das Auftreten der beschriebenen Effekte und deren Auswirkungen äußerst abhängig vom Messprinzip, der Bauart, dem Hersteller und den Einsatzbedingungen der DFS sind. Derartige Probleme müssen nicht zwangsläufig auftreten, der Betreiber sollte jedoch sensibilisiert sein und entsprechende Vorkehrungen und Kontrollen treffen. Die Abweichungen können in der Summe aller möglichen Einflüsse zu erheblichen wirtschaftlichen Konsequenzen führen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Betrachtet man lediglich einen Durchfluss q_k aus dem Kalibrierbereich $q_l \leq q \leq q_p$ dann weist

- der DFS nach dem Einbau meist bereits eine Veränderung gegenüber der Messabweichung am Prüfstand auf; bei einem bestimmten Durchfluss q_k beträgt die Verschiebung gegenüber der Kalibrierkurve am Prüfstand:

$$d_1 = |F(q_k, t_1) - F(q_k, t_0)|.$$

In *Bild 5* ist diese Veränderung graphisch dargestellt.

- Zum Zeitpunkt t_2 (beispielsweise nach dem Ablauf einer Eichgültigkeitsdauer) hat die Sensorcharakteristik eine Veränderung erfahren. Am Durchflusspunkt q_k lässt sich nun einen Driftanteil feststellen, der durch

$$d_2 = |F(q_k, t_2) - F(q_k, t_1)|$$

beschrieben werden kann.

Wie lassen sich nun im Einbauzustand die Größen d_1 und d_2 bestimmen? Durch einen Ausbau des DFS und eine weitere Kalibrierung am (möglichst gleichen) Prüfstand wird

nur die Veränderung der Messcharakteristik des DFS gegenüber dem Ausgangszustand ermittelt, nicht jedoch die Größe d_1 , die durch die Abweichung der Kalibrierbedingungen von den individuellen Einbaubedingungen verursacht wird. Die Größe d_2 , die Drift, kann aus der Nachkalibrierung auf dem Prüfstand bestimmt werden, da sie als relative Größe in beiden Fällen (Anlage und Prüfstand) gleich sein sollte. Ein Austausch des DFS gegen ein neues Gerät nach der Zeit t_2 löst das grundsätzliche Problem der unbekanntenen Größen d_1 und d_2 auch nicht.

Die einzige Möglichkeit, die Größe d_1 zu bestimmen, ist die Nachkalibrierung bzw. Nachprüfung des DFS im Einbauzustand. Durch eine Wiederholung dieser Vor-Ort-Messung kann dann auch d_2 ermittelt werden. Welche Methoden stehen nun hierzu heute zur Verfügung?

Hinweis

Die Möglichkeiten zur Vor-Ort-Überprüfung von großen DFS werden in einem zweiten Teil dieses Aufsatzes in Heft 7-8/2011 der *EuroHeat&Power* erläutert. Nach einer Vorstellung des LDV-Segmentverfahrens wird dieses Messverfahren mit dem Ultraschall-clamp-on-Verfahren verglichen. Abschließend werden die heutigen rechtlichen Rahmenbedingungen für Vor-Ort-Kalibrierungen diskutiert.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft: Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme vom 20. Juni 1980 (AvBFernwärmeV) (BGBl. I S. 742), zuletzt geändert durch Art. 5 des Gesetzes vom 4. November 2010 (BGBl. I S.1483).
- [2] EN 1434: Wärmehähler Teil 1 bis Teil 6; Ausgabe 2007.
- [3] Arbeitsgemeinschaft Mess- und Eichwesen: Richtlinien für die Eichung von Volumensmessgeräten für strömendes Wasser und Anforderungen an Normale, Teil 3: Heißwasserzähler und Durchflusssensoren für Wärmehähler; hrsg. am 7. März 2001.
- [4] EN ISO 5167-1 und EN ISO 5167-1/A1: Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten, Teil 1: Blenden, Düsen und Venturirohre in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt; Ausg. 1. April 1996, Änderung A1: 1. August 1998.
- [5] 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.
- [6] Eichordnung – Allgemeine Vorschriften vom 12. August 1988, zuletzt geändert durch Art. 3 § 14 des Gesetzes vom 13. Dezember 2007; hier: Anhang A zu § 8, Ausnahmen von der Eichpflicht, Ziffer 28g. ■

peter.guntermann@de.tuv.com

www.tuv.com/tric