

Matthias Bächle\* und Fernando Puente León

# Unterdrückung stationärer Interferenzsignale bei Ultraschalllaufzeitmessungen mithilfe der Hauptkomponentenanalyse

Suppression of stationary interference signals in ultrasonic transit-time measurements using the principle component analysis

DOI 10.1515/teme-2019-0058

**Zusammenfassung:** Bei der Laufzeitmessung von Ultraschallsignalen, wie sie bei Durchflussmessungen eingesetzt wird, beeinträchtigen überlagerte Interferenzsignale die Genauigkeit der Messung. Diese störenden Signalanteile entstehen u. a. durch eine dispersive Mehrwegeausbreitung über die Rohrwand, was zu einer Überlagerung im selben Frequenz- und Zeitbereich führt, weshalb eine konventionelle Filterung nicht möglich ist. In dieser Arbeit wird ein Verfahren präsentiert, welche den Prozesseinfluss der Temperaturänderung gezielt nutzt und modelliert, um dennoch eine störgrößeninvariante Schätzung der Laufzeit zu ermöglichen. Das Modell nutzt die Hilbert-Transformation in Kombination mit der Hauptkomponentenanalyse, um den Einfluss temperaturunabhängiger Signalanteile zu unterdrücken. Abschließend wird das Verfahren an Messdaten eines Durchflussmesssystems validiert und mit dem konventionellen Verfahren der Nulldurchgangsbestimmung verglichen.

**Schlüsselwörter:** Ultraschalllaufzeitmessung, Störsignale, Hauptkomponentenanalyse.

**Abstract:** For the transit-time measurement of ultrasonic signals, as used for flow measurements, superimposed interfering signals impair the accuracy of the measurement. These signal components are caused, among other things, by a dispersive multipath propagation across the pipe wall, which leads to a interference in the same frequency and time domain, preventing the use of conventional filtering. In this paper, a methodology is presented which specifically employs and models the process influence of the temperature change to allow a disturbance-invariant estimation of the transit-time. The model uses the Hilbert

transform in combination with the principal component analysis in order to suppress the influence of temperature-independent signal components. Finally, the methodology is validated using measurement data from a flow measurement system and compared to the conventional method of zero-crossing determination.

**Keywords:** Ultrasonic flow measurement, interfering signals, principal component analysis.

## 1 Einleitung

Ultraschallbasierte Laufzeitmessungen sind weit verbreitet bei Abstands-, Füllstands- und Durchflusssensoren [8]. Konventionelle Verfahren zur Bestimmung der Laufzeit aus den Messsignalen basieren auf Kreuzkorrelationen oder Nulldurchgangsbestimmungen [5]. Deren Genauigkeit ist abhängig von diversen Faktoren, wie z. B. Pegel der Störsignale, Bandbreite der Ultraschallwandler, Abtastfrequenz oder Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Insbesondere interferierende Störsignale stellen eine große Herausforderung dar, wenn sie aufgrund einer Überlagerung im selben Frequenz- und Zeitbereich durch digitale Filter nicht vom Nutzsignal getrennt werden können. Bei Ultraschalldurchflussmessungen (*ultrasonic flow metering*, UFM) entstehen diese Interferenzsignale durch eine Mehrwegeausbreitung über die Rohrwand, da der übertragene Körperschall keinen Messeffekt trägt [7, S. 469]. Die weiteren Genauigkeit-begrenzenden Faktoren, wie SNR oder eine beschränkte Abtastfrequenz, können mithilfe von Mittelungen und Kombination der Verfahren mit einer Interpolation abgeschwächt werden, wobei für die Interpolation die Modellordnung aus Erfahrungswerten bestimmt werden muss [4].

Im Bereich der UFM werden in der Literatur verschiedene Lösungen für die Separation der Interferenzsignale vorgestellt, welche auf dem Prinzip basieren, dass der Körperschall stationär ist, wohingegen der Fluidschall sich

\*Korrespondenzautor: Matthias Bächle, Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Industrial Information Technology, matthias.baechle@kit.edu

Fernando Puente León, Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Industrial Information Technology

mit der Temperatur oder der Strömungsgeschwindigkeit im Zeitbereich verschiebt. Roosnek [6] bestimmt den Körperschall, indem eine Mittelung ausgewählter Messsignale durchgeführt wird, um eine destruktive Interferenz des Fluidschalls zu erreichen. Der Nachteil liegt darin, dass die notwendige Zeitverschiebung des Fluidschalls über dem Beobachtungsintervall mindestens eine halbe Periodendauer betragen muss. Um auch Fluktuationen des Fluidschallpegels miteinzubeziehen, wurde von Jacobson et al. [2] eine Demodulation mit anschließender Hochpassfilterung zur Unterdrückung der stationären Interferenzsignale vorgeschlagen, wobei das Verfahren sehr schmalbandige Empfangssignale und eine große Variation des Fluidschalls erfordert.

## 2 Problemstellung

Da die Separation von Interferenzsignalen bei Ultraschalllaufzeitmessungen weiterhin eine große Herausforderung darstellt und insbesondere der Körperschall bei UFM die Genauigkeit begrenzt, wird in dieser Arbeit ein neues Verfahren präsentiert, um den Körperschalleinfluss auf die Laufzeitdifferenzbestimmung bei UFM zu reduzieren. Dazu wird der Prozesseinfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit im Fluid, welcher eine temperaturabhängige Absolutlaufzeit  $t_{\text{abs}}$  des Fluidschalls zur Folge hat, genutzt. Im Gegensatz zum Fluidschall kann der Körperschall als stationär angenommen werden, da dessen Temperaturabhängigkeit vergleichsweise gering ist. Das zugehörige Signalmodell lautet:

$$y_h(t) = y_D(t + \tau/2 - t_{\text{abs}}) + y_k(t) + n_h(t), \quad (1a)$$

$$y_r(t) = \underbrace{y_D(t - \tau/2 - t_{\text{abs}})}_{\text{Fluidschall}} + \underbrace{y_k(t)}_{\text{Körperschall}} + n_r(t), \quad (1b)$$

wobei  $y_h(t)$ ,  $y_r(t)$  das Hin- bzw. Rücksignal bezeichnen, welches aus den Signalanteilen Fluidschall  $y_D(t)$ , Körperschall  $y_k(t)$  und Messrauschen  $n_h(t)$ ,  $n_r(t)$  zusammengesetzt ist. Die Messgröße wird durch die Laufzeitdifferenz  $\tau$  und die temperaturabhängige Zeitverschiebung durch  $t_{\text{abs}}(T)$  modelliert.

Für das vorgestellte Verfahren werden mehrere Messsignale  $y_h(t; T)$ ,  $y_r(t; T)$  benötigt, die bei leicht variierender Temperatur  $T$  und konstanter Strömungsgeschwindigkeit aufgezeichnet werden. Zusammen ergeben sie ein Messsignalpaket  $\mathbf{y}_h(t)$ ,  $\mathbf{y}_r(t)$ , zu welchem die Laufzeitdifferenz  $\tau$  geschätzt werden soll. Das Verfahren soll bereits bei einer geringen Variation der Absolutlaufzeit bzw. mit wenigen Signalen funktionieren und eine gute Robustheit gegenüber Messrauschen aufweisen.

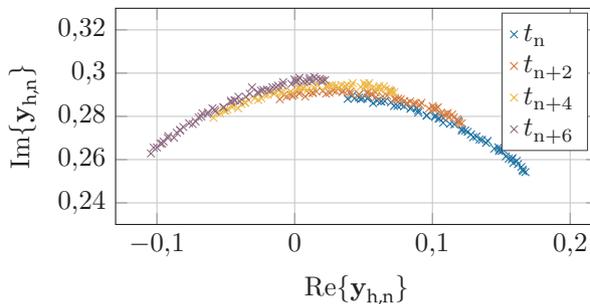


Abb. 1: Punktwolken bei unterschiedlichen  $t_n$ .

## 3 Algorithmus

Die stationären Interferenzsignale können vom Nutzschrift getrennt werden, indem die Messsignale in einen Raum transformiert werden, der invariant gegenüber stationären Signalanteilen ist. Die Beschreibung dieser Transformation und die anschließende Nachverarbeitung, um die Laufzeitdifferenz  $\tau$  zu bestimmen, werden im Folgenden beschrieben.

Das gesamte Messsignalpaket, bestehend aus  $2M$  Messsignalen, wird mithilfe der Hilbert-Transformation  $\mathcal{H}\{\cdot\}$  in analytische Signale

$$\mathbf{y}_{h,c}(t) = \mathbf{y}_h(t) + j\mathcal{H}\{\mathbf{y}_h(t)\}, \quad (2a)$$

$$\mathbf{y}_{r,c}(t) = \mathbf{y}_r(t) + j\mathcal{H}\{\mathbf{y}_r(t)\} \quad (2b)$$

überführt, wodurch aus einzelnen, sinusförmigen Signalen mit Hüllkurve in der komplexen Ebene spiralförmige Trajektorien werden. Da es sich bei (2) um ein Paket von Signalen handelt, können durch Abtastung an einem Zeitpunkt  $t = t_n$  die Vektoren

$$\mathbf{y}_{h,n} = \mathbf{y}_{h,c}(t_n) \quad , \quad \mathbf{y}_{h,n} \in \mathbb{C}^M, \quad (3a)$$

$$\mathbf{y}_{r,n} = \mathbf{y}_{r,c}(t_n) \quad , \quad \mathbf{y}_{r,n} \in \mathbb{C}^M \quad (3b)$$

gewonnen werden, deren einzelne Elemente komplexwertig sind und sowohl den konstanten Anteil Körperschall  $y_k(t_n)$ , als auch die variablen Anteile Messrauschen  $n_h(t_n)$ ,  $n_r(t_n)$  und Fluidschall  $y_D(t \pm \tau/2 - t_{\text{abs}})$  enthalten. Die komplexwertigen Vektoren  $\mathbf{y}_{h,n}$ ,  $\mathbf{y}_{r,n}$  können in Real- und Imaginärteil getrennt und als 2D-Punktwolken

$$\mathbf{P}_{h,n} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{\mathbf{y}_{h,n}^T\} \\ \text{Im}\{\mathbf{y}_{h,n}^T\} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times M}, \quad (4a)$$

$$\mathbf{P}_{r,n} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{\mathbf{y}_{r,n}^T\} \\ \text{Im}\{\mathbf{y}_{r,n}^T\} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times M} \quad (4b)$$

dargestellt werden. In Abbildung 1 werden Beispiele der Punktwolken des Hinsignals für verschiedene Abtastzeitpunkte  $t_n$  gezeigt. Durch die Verschiebung der Absolutlauf-

zeit, die in diesem Beispiel 100 ns beträgt, ist die spiralförmige Trajektorie des Fluidschalls zu erkennen. Weiterhin zeigt sich der Einfluss des Rauschens durch die Abweichung der Punktwolken von einer perfekten Linie und der Einfluss des Körperschalls dadurch, dass die Punktwolken von verschiedenen Abtastzeitpunkten nicht ineinander übergehen. Konstante Anteile in den Punktwolken haben nur einen Einfluss auf die Verschiebung und daher keinen Einfluss auf die Form oder Rotation der Punktwolken. Somit kann durch Verwendung der mittelwertfreien Punktwolken der Körperschall unterdrückt werden. Der Mittelwert wird dazu über die Vorschrift

$$\tilde{\mathbf{P}}_n = [\mathbf{p}_{n,1} - \bar{\mathbf{p}}_n, \dots, \mathbf{p}_{n,M} - \bar{\mathbf{p}}_n] \quad (5)$$

mit

$$\bar{\mathbf{p}}_n = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{p}_{n,i} \quad (6)$$

jeweils für die Punktwolke des Hin- und Rücksignals entfernt, was zu den mittelwertfreien Punktwolken  $\tilde{\mathbf{P}}_{h,n}$  und  $\tilde{\mathbf{P}}_{r,n}$  führt. In diesen sind nur noch die variablen Anteile enthalten, weshalb sie zur Bestimmung der Laufzeitdifferenz herangezogen werden. Da aber auch das Messrauschen noch enthalten ist, kann eine zuverlässige Schätzung nur dann erzielt werden, wenn die temperaturbedingte Änderungen des Fluidschalls deutlich größer als die Varianz des Messrauschens ist.

Ein einfaches Merkmal, anhand dessen die Punktwolken der Hin- und Rücksignale auf Zeitverschiebungen untersucht werden können, ist die Orientierung, welche durch einen Winkel  $\alpha$  beschrieben werden kann. Die Orientierung wird mithilfe der Hauptkomponentenanalyse (engl. PCA) berechnet [1]. Hierzu werden die Eigenwertzerlegungen

$$\mathbf{C}_{h,n} = \mathbf{V}_{h,n} \mathbf{\Lambda}_{h,n} \mathbf{V}_{h,n}^T, \quad (7a)$$

$$\mathbf{C}_{r,n} = \mathbf{V}_{r,n} \mathbf{\Lambda}_{r,n} \mathbf{V}_{r,n}^T \quad (7b)$$

der empirischen Kovarianzmatrizen

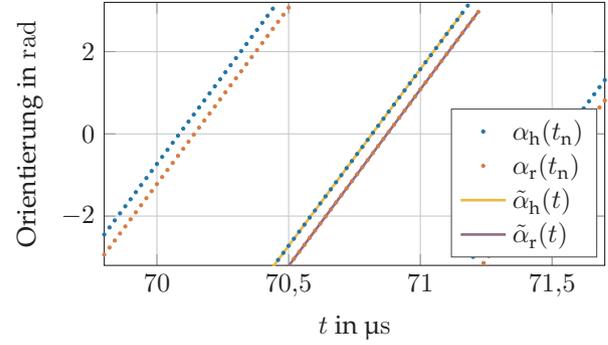
$$\mathbf{C}_{h,n} = \frac{1}{M} \tilde{\mathbf{P}}_{h,n} \tilde{\mathbf{P}}_{h,n}^T \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, \quad (8a)$$

$$\mathbf{C}_{r,n} = \frac{1}{M} \tilde{\mathbf{P}}_{r,n} \tilde{\mathbf{P}}_{r,n}^T \in \mathbb{R}^{2 \times 2} \quad (8b)$$

bestimmt. Aus den jeweils ersten Hauptkomponenten, die in Form der Eigenvektoren  $\mathbf{v}_{h,n}, \mathbf{v}_{r,n} \in \mathbb{R}^2$  mit den jeweils größten zugehörigen Eigenwerten, vorliegen, werden die Orientierungen durch

$$\alpha_h(t_n) = \arctan \left( \frac{\mathbf{v}_{h,n}^T \mathbf{e}_2}{\mathbf{v}_{h,n}^T \mathbf{e}_1} \right), \quad (9a)$$

$$\alpha_r(t_n) = \arctan \left( \frac{\mathbf{v}_{r,n}^T \mathbf{e}_2}{\mathbf{v}_{r,n}^T \mathbf{e}_1} \right), \quad (9b)$$



**Abb. 2:** Verlauf der Punktwolkenorientierungen über der Zeit und zugehörige lineare Regressionen.

mit den Einheitsvektoren  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \in \mathbb{R}^2$ , berechnet. Nach Anwendung der Gleichungen (3) bis (9) auf jeden Abtastpunkt ist das Messsignal vollständig in einen gegenüber dem Körperschall invarianten Raum transformiert. Der Verlauf der Orientierungen ist in Abb. 2 dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Orientierungen nur in Zeitbereichen mit vorhandenem Fluidschall eine zuverlässige Aussage erlauben. Außerhalb dieser Zeitbereiche sind diese Orientierungen nur durch das Messrauschen bestimmt und tragen keine Informationen über die Laufzeitdifferenz. Der in Abb. 2 dargestellte Zeitbereich wurde anhand der Laufzeit des direkten Ausbreitungsweges ausgewählt.

Um aus den Orientierungen  $\alpha_h(t_n), \alpha_r(t_n)$  die Laufzeitdifferenz  $\tau$  zu extrahieren, werden diese durch das von Kupnik et al. [3] vorgeschlagene Verfahren an den  $2\pi$ -Sprungstellen separiert und durch die linearen Regressionen  $\tilde{\alpha}_h(t), \tilde{\alpha}_r(t)$ , wie in Abb. 2 dargestellt, approximiert. Die Auswahl der linearen Regression erfolgt anhand des Eigenwertverhältnisses der zugehörigen Orientierungen. Dadurch wird gewährleistet, dass die lineare Regression mit dem besten SNR verwendet wird. Aus den linearen Regressionen können anschließend die Schnittpunkte mit der Zeitachse bestimmt werden und somit durch einfache Differenzbildung auch die Laufzeitdifferenz  $\tau$ .

## 4 Ergebnisse

Zur Bewertung des Punktwolken-Algorithmus, im Folgenden PW abgekürzt, wird die Messabweichung der Laufzeitdifferenzschätzung in einem *Clamp-on*-UFM-Szenario verwendet. Das Szenario wurde anhand des Signalmodells (1) simuliert und anschließend an einem realen Experiment durchgeführt, wobei die Simulationsparameter Temperatur, Signalanzahl, Strömungsgeschwindigkeit und Störschallpegel identisch zum realen Experiment eingestellt

Tab. 1: Eckdaten der Simulation und des Durchflussexperiments.

| Beschreibung               | Wert                              |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Abtastfrequenz             | 50 MHz                            |
| $f_0$                      | 700 kHz                           |
| Strömungsgeschwindigkeit   | $1 \text{ m s}^{-1}$              |
| Medium                     | Wasser                            |
| Fluid-Störschallverhältnis | 20 dB                             |
| Temperaturbereich          | $15 \text{ °C} - 32,6 \text{ °C}$ |
| Aufgezeichnete Signale $M$ | 2261                              |

sind (siehe Tabelle 1). Für die Simulation wird als Fluidschall ein Gauß-Impuls mit der Frequenz  $f_0$  und einer relativen Bandbreite von 0,35 angesetzt. Die Zeitverschiebung berechnet sich jeweils anhand der temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeit und der Strömungsgeschwindigkeit. Als Körperschall wird ein Messsignal verwendet, welches am realen Aufbau ohne Medium erhalten und anschließend auf das gewünschte Fluid-zu-Störschall-Verhältnis skaliert wurde. Für das Szenario werden die Messsignale über dem Temperaturbereich simuliert bzw. gemessen und in 500 über der Temperatur äquidistant verteilte Pakete aufgeteilt, die jeweils so viele Signale enthalten, dass Absolutlaufzeitverschiebungen des Fluidschalls von 50 ns bzw. 100 ns enthalten sind. Anschließend werden die Ergebnisse der Schätzung mithilfe der *ground-truth* aus der Simulation bzw. einer Referenzmessung während des Experiments als relative Abweichung

$$E(T) = \frac{\tau_{\text{est}}(T) - \tau(T)}{\tau(T)} \quad (10)$$

in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Zum Vergleich wird der Schätzfehler berechnet, der sich bei direkter Bestimmung der Laufzeitdifferenz aus der Nulldurchgangsdifferenz ergibt. Die Vergleichsmethode wird im Folgenden mit ND abgekürzt. Da die Messabweichung der Laufzeitdifferenz abhängig von der Phasenlage des interferierenden Körperschalls ist, wird zur Bewertung der systematischen Abweichung die Messabweichung über dem gesamten Temperaturbereich betrachtet und anhand des *Peak-to-Peak*-Werts

$$\Delta E_{\text{max}} = \max_T E(T) - \min_T E(T) \quad (11)$$

charakterisiert.

#### 4.1 Simulative Bewertung der Modellierungsfehler

Ein wichtiger Aspekt, um die Performanz des vorgestellten Algorithmus zu beurteilen, ist der Einfluss von Modellie-

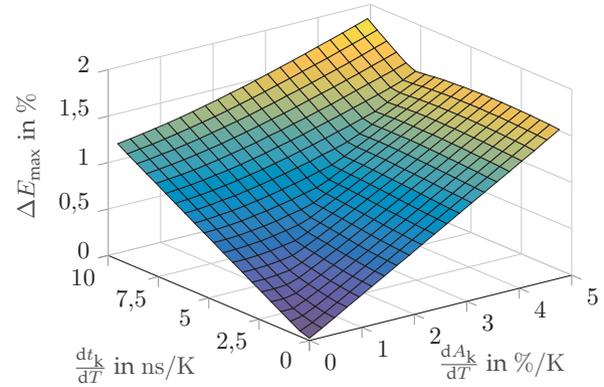


Abb. 3: Simulation der maximalen Messabweichung in Abhängigkeit der Modellierungsfehler.

rungsfehlern auf die systematische Abweichung. Da von stationären Interferenzsignalen ausgegangen wird, ist ein temperaturabhängiger Körperschall

$$y_k(t; T) = A_k(T) \cdot y_k(t - t_k(T)) \quad (12)$$

ein typischer Modellierungsfehler, wobei für die Temperaturabhängigkeit der Amplitude und der Zeitverschiebung ein lineares Modell gewählt wird, dessen Steigung variiert werden kann.

Abbildung 3 zeigt die systematischen Abweichungen gemäß (11), unter der Annahme der Modellierungsfehler  $A_k(T)$  und  $t_k(T)$  des zugrunde liegenden Signalmodells. Um nur den Einfluss der Modellierungsfehler zu untersuchen, ist bei der Simulation das SNR auf 80 dB gesetzt. Auf der x- und y-Achse sind die verschieden stark ausgeprägten Modellierungsfehler der temperaturabhängigen Amplitude  $A_k(T)$  und Zeitverschiebung  $t_k(T)$  des Körperschalls dargestellt, deren Größenordnung anhand des vor dem Fluidschall eintreffenden Körperschalls bestimmt wurde. Es ist zu erkennen, dass sowohl die Amplitudenänderung, als auch die Zeitverschiebung zu systematischen Abweichungen im einstelligen Prozentbereich führen können. Dabei ist anzumerken, dass die absoluten Messabweichungen, die aufgrund der Modellierungsfehler entstehen, abhängig vom Körperschallpegel sind. Bei Betrachtung der Zeitbereiche im realen Messsignal, in denen nur Körperschall vorhanden ist, wird eine Zeitverschiebung von 10 ns/K, eine Amplitudenänderung von 3 %/K und somit eine systematische Abweichung von 1,5 % erwartet. Im Vergleich dazu liegt die Messabweichung in der Simulation mit der ND-Methode bei ca. 14,8 % für den vorliegenden Körperschallpegel. Da die tatsächliche Temperaturabhängigkeit des Körperschalls jedoch zeitabhängig ist, kann bei dieser simulativen Untersuchung nur auf die Größenordnungen und nicht auf die genauen systematischen Abweichungen geschlossen werden.

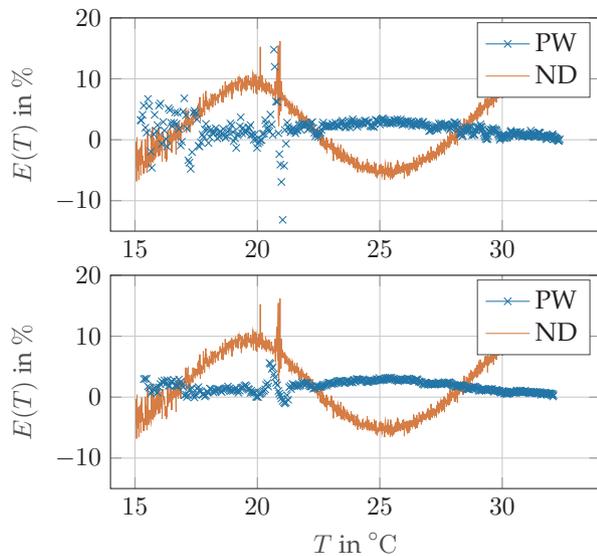


Abb. 4: Messabweichungen in Abhängigkeit der Temperatur bei Verwendung von Punktwolken über 50 ns (oben) und 100 ns (unten).

## 4.2 Experimentelle Ergebnisse

Abschließend erfolgt die Evaluation der PW-Methode anhand der realen Messdaten. Da die Verteilung und die Anzahl der Messsignale über der Temperatur und die damit verbundenen Absolutlaufzeitverschiebungen identisch zur Simulation sind, kann die Einteilung in die Messsignalpakete ebenfalls identisch erfolgen. Alternativ ist auch eine automatisierte Einteilung möglich, da kleine Abweichungen in der Einteilung keinen Einfluss haben. Zur Bewertung der Qualität der Schätzung wird die relative Abweichung (10) herangezogen. Hier steht zum einen die Verbesserung gegenüber der ND-Methode und zum anderen der Einfluss der Paketgröße auf die Robustheit und die systematischen Abweichungen im Vordergrund. Die Ergebnisse für zwei unterschiedlich gewählte Paketgrößen sind in Abb. 4 dargestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass die systematische Abweichung, welche hier in Form einer Schwingung über der Temperatur auftritt, unabhängig von der gewählten Paketgröße ist. Weiterhin zeigt sich, wie bereits durch die Simulation erwartet, dass die systematische Abweichung durch die PW-Methode von 16,5 % (Simulation: 14,8 %) auf 3 % (Simulation: 1,5 %) reduziert werden konnte. Ein Unterschied zwischen den beiden verwendeten Paketgrößen zeigt sich in der besseren Robustheit gegenüber Blasen (siehe  $T \in [15^\circ\text{C}, 21^\circ\text{C}]$ ) und der verringerten Varianz der Messabweichung bei größeren Messsignalpaketen, was sich dadurch erklären lässt, dass bei mehr Punkten die PCA robustere Ergebnisse liefert.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Verfahren vorgestellt, das den Einfluss von temperaturunabhängigen Störsignalen bei der Ultraschalllaufzeitmessungen reduziert und somit die Robustheit gegenüber variierender Temperatur erhöht. Dabei wurde die Performanz des Algorithmus exemplarisch an einer auf dem Laufzeitdifferenzprinzip basierenden Ultraschalldurchflussmessung untersucht. Nach einer simulativen Betrachtung des Einflusses von verschiedenen Modellierungsfehlern wurde die Verbesserung der Genauigkeit an einem realen Experiment zur Durchflussmessung validiert. Die Reduzierung der systematischen Abweichung von 16,5 % auf 3 % zeigt eine gute Übereinstimmung mit den aufgrund von Modellierungsfehlern erwarteten Ergebnissen. Allerdings kann nur eine Laufzeitdifferenz pro Messsignalpaket bestimmt werden, was zur Forderung führt, dass bei Durchflussmessungen konstante Strömungsgeschwindigkeiten während der verwendeten Temperaturänderung vorliegen müssen.

Gegenstand weiterer Forschung ist die Erweiterung des Verfahrens, bei der die Verteilung der Punktwolken genutzt wird, um diese Randbedingung zu lösen.

## Literatur

- [1] J. Beyerer, M. Richter und M. Nagel. *Pattern Recognition: Introduction, Features, Classifiers and Principles*. Walter de Gruyter, Berlin, 2017.
- [2] S. A. Jacobson, P. N. Denbigh und D. E. H. Naudé. A new method for the demodulation of ultrasonic signals for cross-correlation flowmeters. *Ultrasonics*, 23(3):128–132, 1985.
- [3] M. Kupnik, E. Krasser und M. Gröschl. Absolute transit-time detection for ultrasonic gas flowmeters based on time and phase domain characteristics. In *2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, S. 142–145.
- [4] E. Mandard, D. Kouame, R. Battault, J.-P. Remenieras und F. Patat. Methodology for developing a high-precision ultrasound flow meter and fluid velocity profile reconstruction. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 55(1):161–172, 2008.
- [5] G. Rajita und N. Mandal. Review on transit time ultrasonic flowmeter. In *2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC)*, S. 88–92.
- [6] N. Roosnek. Novel digital signal processing techniques for ultrasonic gas flow measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, 11(2):89–99, 2000.
- [7] S. J. Rupitsch. *Piezoelectric Sensors and Actuators*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg, 2018.
- [8] M. Schwarz, B. Uhl, G. Zagar Bernhard und M. Stur. Ultraschallbasierte Messung der Strömungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten und Gasen für den Einsatz in Drainageleitungen in Tunneln. *tm-Technisches Messen*, 86(2):93–103, 2019.