

## SCHÄTZUNG DER DURCHFLUSSMENGE DURCH ANALYSE DER ROHRVIBRATION

Santhosh K. VENKATA, Bhagya R. NAVADA

Abteilung für Instrumentierung und Steuerungstechnik, Manipal Institute of Technology,  
Manipal Academy of Higher Education, Manipal 576104, Indien.

[kv.santhu@gmail.com](mailto:kv.santhu@gmail.com), [kbgagya@gmail.com](mailto:kbgagya@gmail.com)

*eingegangen am 9. September 2018, überarbeitet am 15. Dezember 2018, angenommen am 19.  
Dezember 2018*

**Zusammenfassung:** In diesem Beitrag wird über die Implementierung einer Soft-Sensing-Technik zur Messung der Durchflussmenge von Flüssigkeiten berichtet. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Schätzers zur physikalischen Messung des Durchflusses in einem Rohr durch Analyse der Schwingungen an den Rohrwänden. Die üblicherweise verwendeten Durchflussmesser vom Typ "Kopf" behindern den Durchfluss und die Messung hängt von der Platzierung dieser Sensoren ab. Bei der vorgeschlagenen Technik wird der Vibrationssensor an das Rohr des Flüssigkeitsstroms geklebt. Es wird beobachtet, dass sich die Schwingungen im Rohr mit der Steuerwirkung der Spindel verändern. Ein einachsiger Beschleunigungssensor wird verwendet, um das Vibrationssignal vom Rohr zu erfassen, das Signal wird vom Sensor an das System zur Verarbeitung weitergeleitet. Grundlegende Techniken wie Filterung, Verstärkung und Fourier-Transformation werden zur Verarbeitung des Signals verwendet. Die erhaltene Transformation wird mit einem neuronalen Netzwerkalgorithmus trainiert, um die Flüssigkeitsdurchflussrate zu schätzen. Das künstliche neuronale Netz wird mit Hilfe von Backpropagation und einem künstlichen Bienenvolk-Algorithmus entwickelt. Das Ergebnis zeigt eine erfolgreiche Schätzung der Durchflussmenge mit einem prozentualen Fehler von 0,667.

**Schlüsselwörter:** Beschleunigungsmesser, Schätzung, Frequenzgang, Durchfluss, Neuronales Netz, Vibration

### 1. EINFÜHRUNG

Durchflussregelkreise sind in fast allen Arten von Prozessindustrien zu finden, von der Erdöl- über die Molkerei-, Pharma-, Farbstoff- bis hin zur Lebensmittel- und Getränkeindustrie und so weiter. Das Ziel dieser Fließprozesse ist in erster Linie die Regelung der Durchflussmenge oder die Steuerung sekundärer Parameter wie Flüssigkeitsstand, Temperatur usw. Die Überwachung des Prozesses ist eine wichtige Voraussetzung für die Erzielung des richtigen Endprodukts. Um ein gutes Überwachungssystem zu haben, ist die Erfassung von Informationen an jedem einzelnen Teil des Prozesses unerlässlich. Für die Messung dieser Parameter sind Sensoren unerlässlich. Eine kurze Studie wird durchgeführt, um verschiedene Durchflusssensoren zu verstehen.

Eine Reihe von Forschern hat über Arbeiten auf dem Gebiet der Durchflussmessung berichtet, von denen einige im Folgenden erörtert werden. Marick et al. (2014) haben über eine Methode zur Durchflussmessung ohne Störung des Durchflusses in einer Pipeline berichtet. Diese besteht aus zwei Messgeräten, eines zur Messung des statischen Drucks und das andere zur Online-Messung des Flüssigkeitsdrucks. Die Differenz zwischen diesen beiden Drücken wird verwendet, um die Durchflussrate des Fluids zu ermitteln. Der gemessene Druck wird mit Hilfe eines induktiven Messwertgebers in eine elektrische Größe umgewandelt. Ein System zur

berührungslosen Durchflussmessung wird von Sinha et al. (2015) vorgestellt. Bei dieser Methode wird ein Hall-Effekt-Sensor verwendet, um die Veränderung der Durchflussrate zu messen. Die Hallsonde befand sich oben auf dem Rotameter, sodass die Änderung der Bewegung des magnetischen Schwebekörpers die Ausgangsspannung des Hall-Effekt-Sensors beeinflusst. Auf der Grundlage dieser Schwankungen wurde die Durchflussmenge gemessen. Eine optische Methode zur Durchflussmessung wird von Norgia et al. (2016) beschrieben, bei der eine Laserdiode zur Beobachtung der Laserdivergenz verwendet wird. Bei dieser Methode basiert die Messung des Durchflusses auf der Doppler-Verschiebung aufgrund der in der Flüssigkeit vorhandenen Partikel und der Selbstmischungsfähigkeit der Laserdiode. Kirwan et al. (2016) berichten über ein Gerät zur Durchflussmessung mithilfe eines Bragg-Gitters. Bei dieser Methode wird die Bewegung des Auslegerarms gemessen.

Die Leistung des Gitters wird durch den Flüssigkeitsimpuls in einem runden Rohrbogen verursacht. Es wurde gezeigt, dass die Leistung des Gitters in hohem Maße mit der Durchflussrate durch das Rohr zusammenhängt und auch unabhängig von Temperatur und statischem Druck ist. Liu und Wang (2016) berichten über die Messung des Flüssigkeitsstroms durch ein Rohr mit Hilfe von Streufeldkondensatoren. Die Kondensatoren wurden wie eine kappenartige Struktur um ein Kunststoffrohr herum angeordnet und erzeugten eine Streufeldkapazität innerhalb des Rohrs. Wenn eine Flüssigkeit durch das Rohr fließt, wurde eine Kapazitätsänderung beobachtet, die direkt eine Änderung der Durchflussrate projiziert. Kim et al. (2017) berichten über die Strömungsmessung im Windkanal mit einem piezoelektrischen Sensor. Die Messung der Windströmung basiert auf der dynamischen Belastung, die im Windkanal mit einem Pitot-Rohr und Auslösestreifen gemessen wurde. Der Sensor wurde so konzipiert, dass er empfindlich auf die entstehende Schubspannung reagiert und unempfindlich gegenüber der statischen Spannung ist, die durch den Auftrieb des Wirbelwinds entsteht. Agu et al. (2017) berichten über einen Algorithmus zur Verbesserung der Genauigkeit bei der Messung der Durchflussmenge in offenen Kanälen. Das Durchflusssystem mit offenem Kanal wurde simuliert und die Durchflussmenge wurde anhand der Flüssigkeitstiefe geschätzt. Jaiswal et al. (2017) berichten über die Messung der Durchflussmenge durch Wiegen mit zwei Tanks. Der zweite Tank wurde verwendet, um die Zeit der Wassersammlung zu verlängern und so den Umleitungsfehler zu verringern. Die Redundanz war auch ein Faktor für die Verwendung von zwei Tanks für den Fall, dass ein Tank nicht funktioniert. Die Durchflussmenge wurde auf der Grundlage der Gesamtmenge des gesammelten Wassers und der Zeit für das Sammeln des Wassers berechnet. Über die Messung der Durchflussmenge in großen Rohrleitungen von Wärmekraftwerken mit der Radiotracer-Methode wird berichtet (Biswal et al. 2018; Pecly und Fernandes, 2017). Bei dieser Methode wird eine Radiotracer-Lösung mit bekannter Konzentration über einen bestimmten Zeitraum mit gleichbleibender Rate in ein großes Rohr eingespritzt. An den Abflüssen, in denen der Radiotracer homogen vermischt wurde, wurden Wasserproben entnommen und anhand der Radiotracer-Konzentration wurde die Durchflussrate gemessen. Lay-Ekuakille et al. (2014) berichten über ein System zur Überwachung der Durchflussmenge mittels Videomessung. Diese Methode kann verwendet werden

wo eine berührungslose Messung erforderlich ist. Krejčí et al. (2017) berichten über die Messung eines kleinen Flüssigkeitsstroms mithilfe elektrochemischer Phänomene. Dieses Phänomen erfordert eine elektrochemische Verbindung, weshalb diese Methode in praktischen Anwendungen nicht verwendet wird. Santhosh und Roy (2016) berichteten über ein Verfahren zur Durchflussmessung mittels Venturi, das unabhängig von Schwankungen des Flüssigkeitstyps und der Rohrabmessungen ist.

Forscher haben auch über Arbeiten im Bereich der indirekten Messung des Flüssigkeitsdurchflusses berichtet, von denen hier nur wenige vorgestellt werden. Eine Methode zur Messung des Wasserverbrauchs in einem Rohr wurde von Schantz et al. (2015) vorgestellt. Bei dieser Methode wurde ein Beschleuniger zur Schwingungsmessung an den Rohren verwendet, anhand dessen der Wasserverbrauch ermittelt wurde. Die Schwingungen an den Rohren waren nicht nur auf den Flüssigkeitsstrom zurückzuführen, sondern auch auf das Ein- und Ausschalten von Ventilen, was zu Druckänderungen führte. Hobeck und Inman (2015) berichten über die Messung des Drucks, der durch eine turbulente Luftströmung mit geringer Geschwindigkeit verursacht wird, mithilfe einer Drucksonde. Die Drucksonden wurden so konstruiert, dass sie hochturbulente Luftströme mit geringer Geschwindigkeit mit hoher Empfindlichkeit messen können. Die konstruierten Drucksonden waren in der Lage, den Luftstrom mit einer mittleren Geschwindigkeit von 0-12 m/s mit einer Empfindlichkeit von 0,064 mV/Pa zu messen. Navada et al. (2017) berichten über die Schätzung der Durchflussmenge am Eingang eines Regelventils in einem Durchflusssystem unter Verwendung eines beobachterbasierten weichen Sensors. Der Beobachter wird entwickelt, indem die Messung einer Blende verwendet wird, die zur Messung der Durchflussrate am Ausgang des Regelventils platziert wird. Malan et al. (2017) berichten über die Entwicklung eines virtuellen Sensors zur Messung der Durchflussmenge in Rohren mit Hilfe mathematischer Modelle. Durch die Messung des Ventilzustands und der Durchflussmenge am Einlass wurde ein mathematisches Modell zwischen Durchflussmenge und Druckverlust gefunden. Zur Schätzung der Durchflussmenge durch den Wärmekörper wurde der Hardy-Kreuz-Algorithmus verwendet. Dinardo et al. (2018) berichteten über die Messung des Flüssigkeitsdurchflusses durch Beobachtung der Schwingungen der Flüssigkeitsleitung. In dieser Arbeit haben die Autoren den quadratischen Mittelwert des Vibrationssignals betrachtet, und die Variation dieses Parameters wurde mit der Flüssigkeitsdurchflussrate in Beziehung gesetzt und als proportional eingestuft.

In diesem Abschnitt werden einige Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Vibrationsmessung beschrieben. Über die Messung der Amplitude von Mikrovibrationen mit optischen Interferometern berichteten Yasuda et al. (2015). Bei dieser Methode wurden zwei Strahlen verwendet, einer als Referenz und der andere, der vom vibrierenden Körper reflektiert wurde. Die vom vibrierenden Körper reflektierte Welle erzeugt ein Interferenzsignal, dessen Anzahl der Amplitudenspitzen proportional zur Schwingungsamplitude war. Guozhen et al. (2016) berichten über einen Bragg-Gittersensor zur Messung von Vibrationen. Basierend auf dem Frequenzgang des Gitterbeschleunigungssensors wurde die Vibration gemessen. Qiu et al. (2018) berichteten über eine berührungslose Methode zur Messung von Vibrationen mit einem binokularen Vision-Sensor und piezoelektrischen Aktoren. In dieser Arbeit wurde berichtet, dass der binokulare Sensor eine gute Leistung für die Messung von niederfrequenten

Schwingungen und strukturellen Verschiebungen an mehreren Punkten bietet. Kim et al. (2015) berichteten über die Verfolgung von Vibrationen rotierender Objekte mithilfe von Bildverarbeitungstechniken. Bei dieser Methode wurde ein Bildsensor verwendet, um die Position des Laserstrahls und der Landmarke auf dem rotierenden Objekt zu verfolgen und die Schwingungseigenschaften zu ermitteln. Koshekov et al. (2016) berichteten über einen Algorithmus zur Messung der Vibrationen eines Pumpenaggregats, um die Funktionsweise der Pumpe zu analysieren. Bei dieser Methode wurden Vibrationssignale erfasst, indem Sensoren an verschiedenen Stellen des Pumpenaggregats angebracht wurden. Der quadratische Mittelwert der Schwingungsgeschwindigkeit wurde berücksichtigt, um Informationen über das Muster der Schwingungssignale zu erhalten. Eine berührungslose Methode der Schwingungsmessung wird von Lezhin et al. (2017) für Hochdruckmotoren beschrieben. Bei dieser Methode wird ein eindimensionales Vibrometer verwendet, um die

wird über Details der Oberflächenvibrationen des Motors berichtet und mit zwei anderen Methoden verglichen. Son et al. (2015) berichten über die Messung der Schwingungsverschiebung von einem entfernten Standort aus mit einer Kamera. Dieser Ansatz wurde für den Einsatz in Bereichen vorgeschlagen, in denen die Messung von Vibrationen vor Ort schwierig ist. Die Verschiebung wurde mit der Technik der Kantenerkennung und durch die zweite Ableitung des Bildes gemessen. Diese Methode erwies sich im Vergleich zu anderen Methoden als besser, da die Möglichkeit bestand, Schwingungen an mehreren Punkten zu messen. Mozuras (2017) stellte eine Technik zur Messung stark verrauschter Schwingungssignale unter Verwendung eines nichtlinearen Wandlers vor. Ein monotoner nichtlinearer Wandler wurde verwendet, um die Schwingungssignale zu erhalten, deren Spektralkomponenten mit Hilfe der Fourier-Transformation ermittelt wurden. Qiu und Lau (2018) berichten über die Messung von Strukturschwingungen mit einem optischen elektronischen Sensor. Über die Messung der Ausbreitung von Oberflächenvibrationen im Boden mit Hilfe von Beschleunigungssensoren berichten Czech und Gosk, (2017). In dieser Arbeit wurden Beschleunigungssensoren auf vier verschiedene Arten im Boden montiert, wobei die Ringmontage als die zuverlässigste Methode bewertet wurde. Lee et al. (2018) berichteten über einen batterielosen Sensor zur Messung von Vibrationen, die in den rotierenden Wellen großer Schiffe entstehen. Das magnetostriktive Prinzip wurde verwendet, um die durch Hochgeschwindigkeitsrotationen induzierten Schwingungen zu messen. Diese Sensoren wurden aufgrund ihrer gesunden Arbeitsweise in rauen Umgebungen verwendet. Ein Ultraschall-Stroboskop zur Messung von Unterwasservibrationen wurde von Luo et al. (2014) vorgestellt. Die Autoren haben berichtet, dass diese Methode in der Lage war, die Online-Informationen über die Unterwasserschwingungen zu erhalten. Zum Testen des Sensors wurde ein Ausleger unter Wasser verwendet und mit herkömmlichen Sensoren verglichen. Dieser Sensor war unempfindlich gegenüber Umweltveränderungen, und der Hauptvorteil war, dass es sich um eine berührungslose Messung handelte.

Aus der Umfrage geht hervor, dass der Durchfluss auf verschiedene Weise gemessen wird, wobei die Durchflussmesser mit Druckhöhe oder Hindernissen den größten Teil der verfügbaren Messverfahren ausmachen. Bei den Durchflussmessern mit Druckhöhe basiert die Messung des Durchflusses auf der Messung der Druckdifferenz, die durch die Behinderung des Durchflusses entsteht. Aus den Berichten geht jedoch hervor, dass die Leistung dieser Sensoren immer von der Position abhängt, an der der Sensor angebracht ist. Die Eigenschaften des Sensors hängen oft von der Zusammensetzung der Flüssigkeit ab. In der vorgeschlagenen Arbeit wird daher eine berührungslose Technik vorgestellt, die von den Eigenschaften der Flüssigkeit unabhängig ist.

## 2. VERSUCHSAUFBAU

Der Versuchsaufbau besteht aus einem einfachen Durchflusssystem, das aus einem Vorratsbehälter, pneumatischen Stellgliedern und Durchflussmessern besteht (siehe Abb. 1). Das P- und I-Diagramm des Durchflusssystems ist in Abb. 2 dargestellt. Die durchgezogenen Linien, die die Blöcke verbinden, stellen den Flüssigkeitsstrom dar, die gestrichelten Linien das elektrische Signal in Form von Strom

und die gepunktete Linie den Luftdruck. Der Prozess besteht aus einem Vorratsbehälter, aus dem Wasser gepumpt wird. Das Wasser fließt entlang des Weges, an dem ein Regelventil, ein Rotameter und eine Blende angebracht sind, bevor es in den Vorratsstank zurückfließt. Der Schwebekörper-Durchflussmesser zeigt die Menge der aus dem Regelventil fließenden Flüssigkeit an. Ein Differenzdrucktransmitter (DPT) wird montiert, um die Druckdifferenz zu messen, die durch die Blende zur Strömung hin entsteht. Die Druckdifferenz über der Blende wird gemessen und vom Druckmessumformer in Form einer mV-Spannung dargestellt. Ein gleichprozentiges Luft-zu-Öffnen-Regelventil mit einer 3/4-Zoll-Ventilöffnung ist zwischen Pumpe und Rotameter angebracht, um die Durchflussmenge zu variieren. Der pneumatische Aktuator besteht aus einem Strom/Druck-Wandler, einer Membran, einem oberen

und untere Druckkammer, Feder und Ventilschaft. Der vom Benutzer eingegebene Strom im Bereich von 4-20 mA wird an den Druckwandler weitergeleitet, der ihn in einen Druck im Bereich von 3-15 psi umwandelt, der auf die untere Kammer des Steuerventils ausgeübt wird. Sobald der Druck in der unteren Kammer höher ist als in der oberen, bewegt sich die Membran nach oben und das Ventil öffnet sich, was zu einem Anstieg des Ausgangsdurchflusses führt. Wenn der Druck in der unteren Kammer geringer ist als in der oberen Kammer, bringt die Feder die Ventilschneidung in die Schließstellung, so dass keine Flüssigkeit aus dem Steuerventil fließt. In der Nähe der Pumpe befindet sich ein Bypass-Ventil, das den Durchfluss zurückführt, wenn das Regelventil vollständig geschlossen ist. Die Durchflussmenge am Ausgang des Regelventils hängt hauptsächlich von der Stellung des Ventils und der Durchflussmenge am Eingang des Regelventils ab.



Abb. 1. Aufbau des Fließprozesses

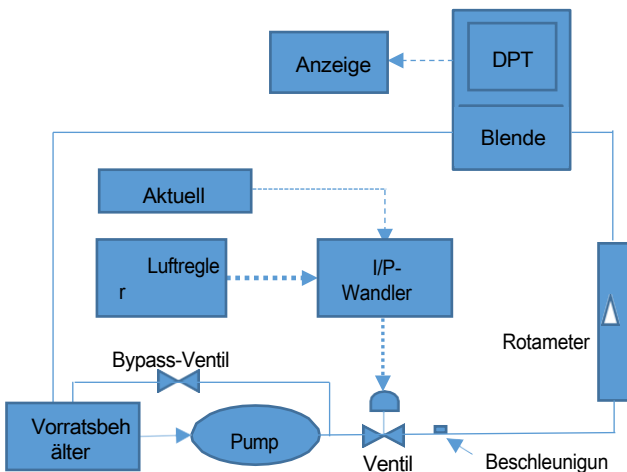


Abb. 2. P&I-Diagramm des Fließprozesssystems

### 3. ZIELSETZUNG

Um die bestehende Technik der Durchflussmessung mit Hilfe eines Blenden-Durchflussmessers zu verstehen, werden Tests durchgeführt. Die Leistung des Sensors wird analysiert, wenn der Lochdurchmesser der Blende und die Flüssigkeit variiert werden. Die Eigenschaften des Blenden-Durchflussmessers werden mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung (siehe unten) verstanden.

wobei:  $C$  - ist der Koeffizient,  $A_{th}$  - Querschnittsfläche an der Blende,  $b$  - Verhältnis von Blende und Rohrdurchmesser,  $\rho$  - Dichte der Flüssigkeit,  $\Delta P$  - Druckdifferenz

Die Druckdifferenz für unterschiedliche Durchflüsse bei verschiedenen Beta 'b' ist in Abb. 3 dargestellt. In der vorliegenden Studie wird ein Rohrdurchmesser von 1 Zoll und ein Blendendurchmesser von 0,5, 0,65 und 0,4 Zoll angenommen, wobei der Durchfluss im Bereich von 0 bis 1800 lph variiert wird.

Ähnliche Tests werden unter Variation der Flüssigkeitsdichte durchgeführt; das Diagramm dazu ist in Abb. 4 dargestellt.

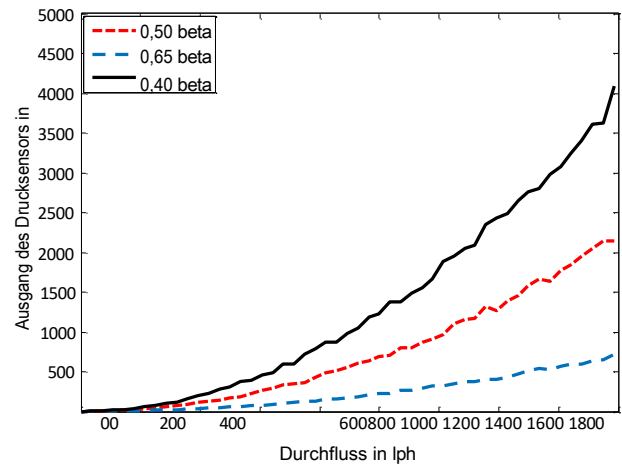


Abb. 3. Variation der Kenndaten des Durchflusstransmitters mit 'b'

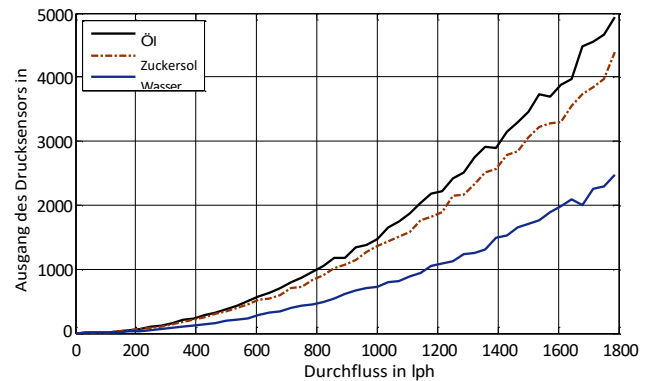


Abb. 4. Veränderung der Kenndaten des Durchflusstransmitters mit der "Flüssigkeitsdichte"

Aus dem obigen Diagramm und den Gleichungen ist ersichtlich, dass die vorgesehene Messtechnik mit Durchflussmessern wie Blende, Venturi usw. oder elektromagnetischen Durchflussmessern oder Rotametern durch die Platzierung des Sensors beeinträchtigt wird. Diese Messgeräte würden die Strömungseigenschaften in der Rohrleitung beeinträchtigen, und wenn ein physikalischer Fehler an diesen Sensoren auftritt, ist der Austausch dieser Sensoren sehr mühsam und muss nur von autorisiertem Personal durchgeführt werden. Daher wird in diesem Beitrag eine Technik vorgeschlagen, die den Flüssigkeitsstrom ohne Kontakt mit der Strömung misst und auch keine Auswirkungen auf die Strömungseigenschaften hat.

4. METHODIK

Durchflussmen  
ge:  $\square = \frac{C_{Ath} \cdot \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}}}{\sqrt{1-b^4}} \cdot l_{ph}$

(1)

Um das im vorangegangenen Abschnitt erörterte Ziel zu erreichen, ist es

Es ist wichtig, den Durchfluss mit einem zweiten Sensor zu messen. Sek- Die Daten eines zusätzlichen Sensors (Beschleunigungsmesser) werden verwendet, um den Durchfluss zu schätzen.

Rate in der vorgeschlagenen Arbeit. Der Schwingungssensor ist gekoppelt an



der Rohroberfläche. In der vorgeschlagenen Arbeit wird ein einachsiger Beschleunigungsaufnehmer mit einer Empfindlichkeit von 9,8 mV/g am Rohr am Ausgang des pneumatischen Regelventils montiert, wie in Abb. 5 gezeigt.



Abb. 5. Montage des Beschleunigungsmessers

Die Schwingungsdaten des Beschleunigungsaufnehmers werden durch einen analogen Verstärker geleitet, der mit Hilfe einer Datenerfassungskarte an einen Computer weitergeleitet wird. In der vorgeschlagenen Arbeit wird das kompakte RIO von National Instruments zur Erfassung des Signals verwendet. Die vom Beschleunigungsaufnehmer erfassten Daten sind in Abb. 6 und Abb. 7 für Durchflussraten von 1800 lph bzw. 100 lph dargestellt.

Um das Signal weiter zu analysieren, wird ein Bandpassfilter entworfen. Der Filter ist so konzipiert, dass er die Oberwellen im Signal reduziert. Der Bandpassfilter wird unter Verwendung der Sallen-Key-Architektur (Zin Ma Ma Myo et al. 2009) wie unten dargestellt entworfen.

Übertragungsfunktion, 
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K \prod_{i=1}^n (s + \sigma_i)}{\prod_{j=1}^m (s + \omega_j)}$$
 (2)

Es wird eine Gleichung vierter Ordnung betrachtet, wobei "K<sub>i</sub>" die Verstärkung bei der mittleren Frequenz "f<sub>i</sub>" jedes Filters ist. "P<sub>i</sub>" ist die Polqualität jedes Filters, "B" ist der Filterkoeffizient. "a" und "1/a" sind die Mittenfrequenzen der einzelnen Filter.

Verstärkung bei f<sub>i</sub>: 
$$K_i = \frac{B^3}{B} \quad (3)$$

Filtergüte 
$$Q_i = \frac{1}{3-B} \quad (4)$$

Die nach der Filterung erhaltene Ausgabe ist in Abb. 8 und Abb. 9 dargestellt.

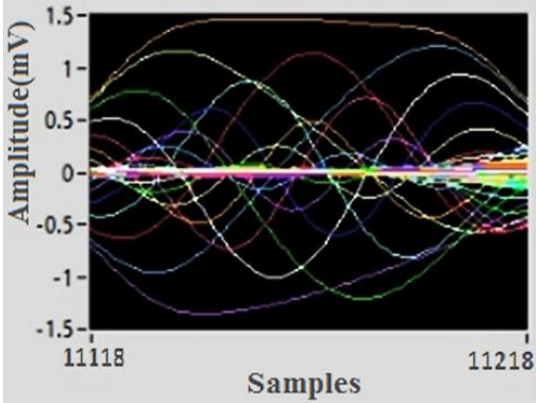


Abb. 7. Beschleunigungsmessersignal für einen Durchfluss von 100 lph

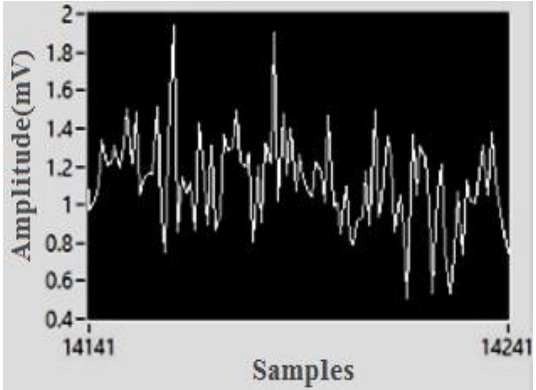


Abb. 8. Gefilterte Leistung bei einem Durchfluss von 1800 lph

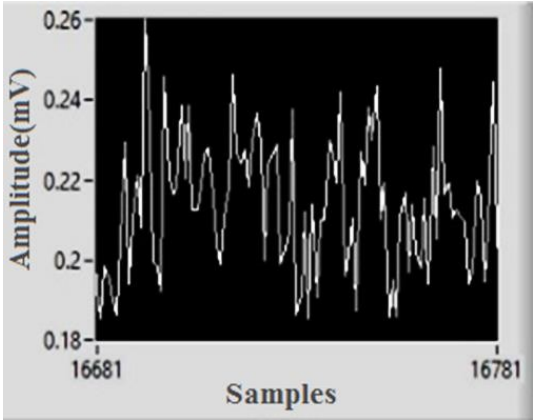
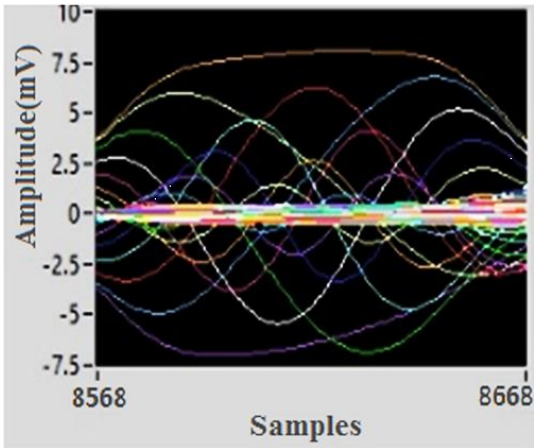
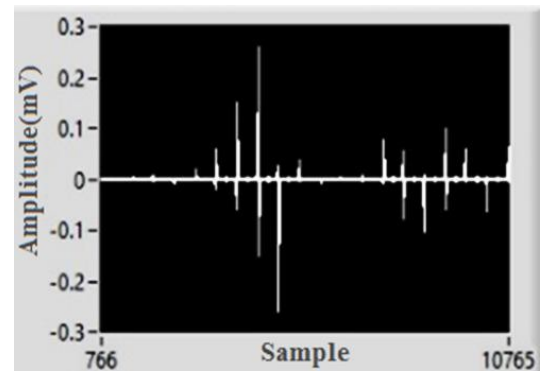


Abb. 6. Beschleunigungsmessersignal für einen Durchfluss von 1800 lph



**Abb. 9.** Gefilterte Leistung bei einem Durchfluss von 100 lph

**Abb. 10.** Fourier-Transformationsergebnis für einen Durchfluss von 1800 lph





Neuronen werden in verschiedenen Netzen wie linearem Netz, Backpropagation-Netz, Radialbasisfunktion usw. gruppiert. In der vorgeschlagenen Arbeit wird ein Backpropagation-Netzwerk implementiert. Das Multi

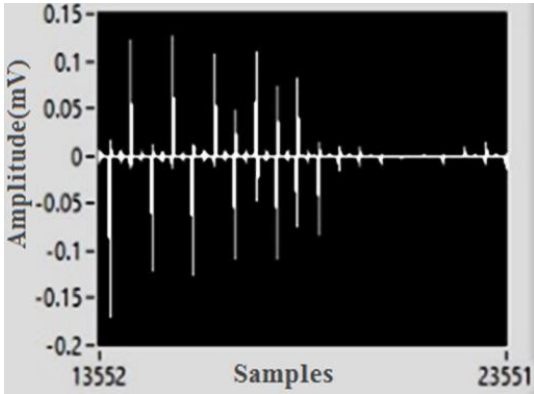


Abb. 11. Fourier-Transformationsergebnis für einen Durchfluss von 100 lph

Die Fourier-Transformation des gefilterten Signals wird durchgeführt, um eine Größenfunktion in Bezug auf die Durchflussmenge zu erhalten. Die Fourier-Transformation des Signals für einen Durchfluss von 100 lph und 1800 lph ist in Abb. 10 bzw. Abb. 11 dargestellt. Das erhaltene Fourier-Transformationssignal wird zur Schätzung der Durchflussmenge mit Hilfe eines neuronalen Netzalgorithmus verwendet. Zum Training wird das neuronale Netz mit Eingangsdaten und Zieldaten gefüttert. Das Lernen der Neuronen wird durch Variation der gewichteten Funktion und der Aktivierungsfunktion erreicht. In der Literatur wurden verschiedene Algorithmen vorgestellt, um die Werte der gewichteten Funktion zu variieren, wie der Levenberg-Marquardt-Algorithmus, der genetische Algorithmus, der künstliche Bienenvolk-Algorithmus, die Ameisenvolk-Optimierung usw. In der vorgeschlagenen Arbeit wird der künstliche Bienenvolk-Algorithmus zum Trainieren der Gewichte verwendet.

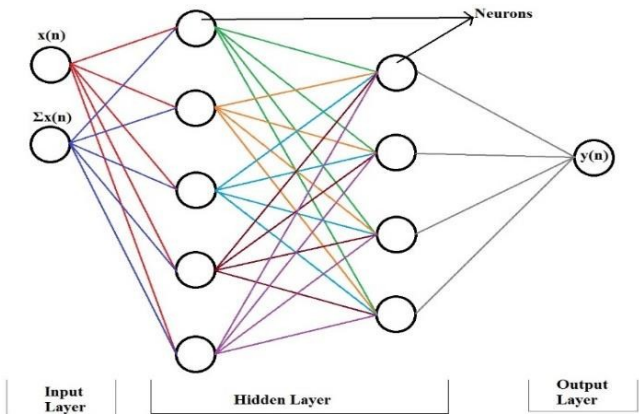


Abb. 12. Struktur des neuronalen Netzes

Tab.1. Parameter des neuronalen Netzes

Trainingsdaten	2x86	60%
Validierungsdaten	2x29	20%
Testdaten	2x29	20%
Eingabeschicht	2 Neuronen	
Verborgene Schichten	5 Neuronen	
	4 Neuronen	
Output-Schicht	1 Neuron	
Aktivierungsfunktion	Tanh	
Lernrate	0.03	
Bereinigungsquote	0.1	

Schicht Perceptron-Schicht, bestehend aus zwei versteckten Schichten, einer Ausgangs- und einer Eingangsschicht. Die Ausgangsschicht besteht aus einem einzigen Neuron, die versteckten Schichten bestehen aus fünf und vier Neuronen. Die Eingabeschicht besteht aus zwei Neuronen, die mit dem Fourier-Transformations-Signal und dem normalisierten Fourier-Transformations-Signal beaufschlagt werden, wie in Abb. 12 dargestellt. Die nach dem Training erhaltenen Parameter des neuronalen Netzes sind in Tab. 1.

5. ERGEBNISSE UND ANALYSE

Die mit dem Beschleunigungsmesser als Sensor entwickelte Technik zur Durchflussschätzung wird mit verfügbaren Standardinstrumenten getestet und validiert. Für die Prüfung wird die Durchflussmenge im Bereich von 0 bis 1800 lph variiert. Die zu prüfende Flüssigkeit wird ebenfalls variiert, um die Leistung des entwickelten Systems zu erfassen. Die Ergebnisse der durchgeführten Tests sind in Tab. 2.

Tab. 2. Ergebnisse der Tests mit dem physischen System

Tatsächlicher Durchfluss (lph)	Geschätzter Durchfluss (lph)	Flüssigkeitstyp	%-Fehler
50	49.5	Wasser	1.00
150	151.2	Wasser	-0.80
400	401.5	Wasser	-0.38
510	513.6	Wasser	-0.71
650	648.2	Wasser	0.28
770	771.6	Wasser	-0.21
910	916.4	Wasser	-0.70
1000	997.2	Wasser	0.28
1180	1181.7	Wasser	-0.14
1320	1326.5	Wasser	-0.49
1510	1494	Wasser	1.06
1700	1721	Wasser	-1.24
350	351.8	Zuckerlösung	-0.51
480	484.8	Zuckerlösung	-1.00
610	607.4	Zuckerlösung	0.43
870	876.1	Zuckerlösung	-0.70
990	998.2	Zuckerlösung	-0.83
1250	1254.1	Zuckerlösung	-0.33
1470	1463.5	Zuckerlösung	0.44
1650	1662.3	Zuckerlösung	-0.75
1780	1776.4	Zuckerlösung	0.20

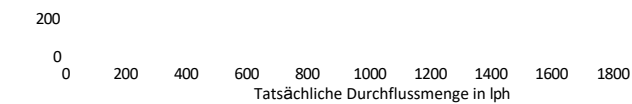
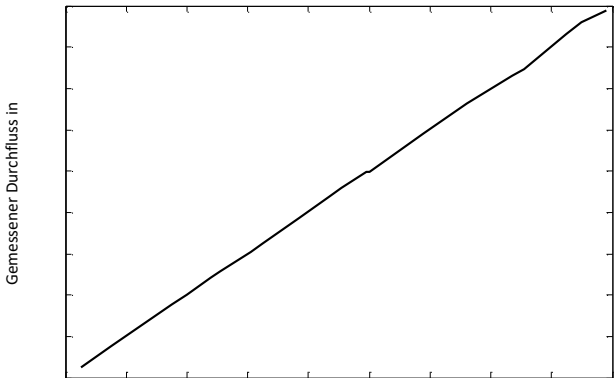
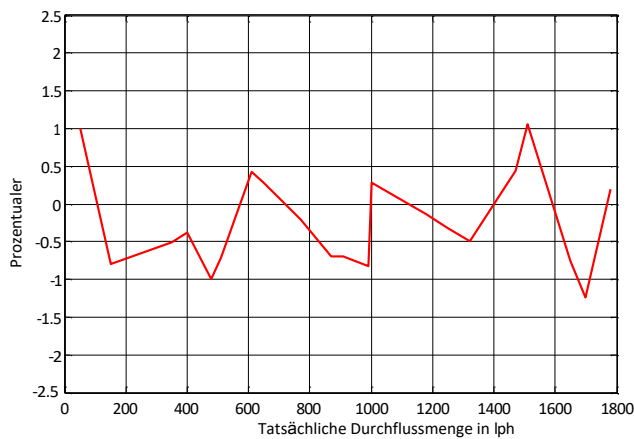


Abb. 13. Eingangs-Ausgangsleistung der vorgeschlagenen Technik





**Abb. 14.** Fehlerleistung der vorgeschlagenen Technik

Die Leistung der vorgestellten Arbeit bei der Schätzung der Durchflussmenge der Flüssigkeit ist in Tab. 2. Es wird festgestellt, dass die Durchflussrate mit einem maximalen mittleren quadratischen Fehler von 1,24 % genau geschätzt wird. Die vorgestellte Arbeit ist in der Lage, die Durchflussrate unabhängig vom Flüssigkeitstyp innerhalb des maximalen Fehlers von 21 lph zu messen, ohne dass das System für die Variation des Flüssigkeitstyps neu kalibriert werden muss. Die Darstellung des Fehlers und der Eingangs-/Ausgangskennlinien ist in Abb. 13 und Abb. 14 zu sehen. Die Kennlinien zeigen ein lineares Verhalten des Messsystems.

## 6. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Durchflussmessung ist einer der am häufigsten verwendeten Prozesse in der Industrie und muss daher sehr präzise und genau sein. Es wird auch erwartet, dass das System robust ist und bei Änderungen der Parameter weniger neu kalibriert werden muss. Vorhandene Kontaktmessverfahren unterbrechen oft das Strömungsverhalten und müssen auch bei Änderungen der Flüssigkeitsart neu kalibriert werden. Die Technik zur Schätzung des Flüssigkeitsdurchflusses auf der Grundlage der Schwingungsanalyse der Struktur wurde mit dem Ziel entwickelt, die Durchflussrate auch bei Änderungen der Flüssigkeitsart genau zu messen. Die Technik wurde entwickelt, indem das Signal des Beschleunigungssensors in den Phasen Verstärkung, Filterung, Fourier-Transformation und Modellierung eines neuronalen Netzes verarbeitet wurde. Die Leistung des trainierten Systems wurde anhand eines praktischen Aufbaus analysiert, und die Ergebnisse zeigen eine erfolgreiche Implementierung mit einem tolerierbaren mittleren quadratischen Fehler von 0,67 %.

Aus den Eigenschaften des Durchflussmesssystems geht hervor, dass das Gerät für die Durchflussmessung in rauen Umgebungen eingesetzt werden kann, wenn die Flüssigkeitsparameter ständig schwanken.

## REFERENZEN

1. **Agu C.E., Hjulstad Å., Elseth G., Lie B.** (2017), Algorithm with improved accuracy for real-time measurement of flow rate in open channel systems, *Flow Measurement and Instrumentation*, 57, 20-27.
2. **Biswal J., Pant H.J., Goswami S., Samantray J.S., Sharma V.K., Sarma K.S.S.** (2018), Measurement of flow rates of water in

large diameter pipelines using radiotracer dilution method, *Flow Measurement and Instrumentation*, 59, 194-200.

3. **Czech K.R., Gosk W.** (2017), Measurement of surface vibration accelerations propagated in the environment, *Procedia engineering*, 189, 45-50.

4. **Dinardo G., Fabbiano L., Vacca G., Lay-Ekuakille A.** (2018), Vibrational signal processing for characterization of fluid flows in pipes, *Measurement*, 113, 196-204.
5. **Guozhen Y., Yongqian L., Zhi Y.** (2016), A novel fiber Bragg grating acceleration sensor for measurement of vibration, *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, 127(20), 8874-8882.
6. **Hobeck J. D., Inman D.J.** (2015), Low-Cost Pressure Probe Sensor for Predicting Turbulence-Induced Vibration from Invasive Low- Velocity Turbulent Flow Measurements, *IEEE Sensors Journal*, 15(8), 4373-4379.
7. **Jaiswal S.K., Yadav S., Agarwal R.** (2017), Design and develop- ment of a novel water flow measurement system, *Measurement*, 105, 120-129.
8. **Kim D., Khalil H., Nam J., Park, K.** (2015), Image-based tracking system for rotating object vibration measurement using laser scan- ning vibrometer, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(8), 1717-1721.
9. **Kim T., Saini A., Kim J., Gopalathnam A., Zhu Y., Palmieri F.L., Jiang X.** (2017), Piezoelectric Floating Element Shear Stress Sensor for the Wind Tunnel Flow Measurement, *IEEE Trans. Ind. Electron*, 46, 1-1.
10. **Kirwan P.P., Creighton D., Costello C., O'Brien T.P., Moloney K.W.** (2016), Momentum Change Flow Meter With Pressure Compensation Using FBGs, *IEEE Sensors Journal*, 16(19), 7061-7064.
11. **Koshekov K.T., Klikushin Y.N., Kobenko V.Y., Sof'ina N.N., Savostin A. A., Kashevkin A.A.** (2016), Testing a pump unit by identification measurements of vibration signals, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 52(5), 280-286.
12. **Krejčí J., Ježová L., Kučerová R., Plička R., Broža Š., Krejčí D., Ventrubová I.** (2017), The measurement of small flow. *Sensors and Actuators A: Physical*, 266, 308-313.
13. **Lay-Ekuakille A., Vergallo P., Griffo G., Morello R.** (2014), Pipeline flow measurement using real-time imaging, *Measurement*, 47, 1008-1015.
14. **Lee J.K., Seung H.M., Park C.I., Lee J.K., Lim D.H., Kim, Y.Y.** (2018), Magnetostruktives Patch-Sensorsystem zur batterie- losen Echtzeitmessung von Torsionsschwingungen rotierender Wellen, *Journal of Sound and Vibration*, 414, 245-258.
15. **Lezhin D.S., Falaleev S.V., Safin A.I., Ulanov A.M., Vergnano D.** (2017), Comparison of different methods of non-contact vibration measurement, *Procedia Engineering*, 176, 175-183.
16. **Liu Z., Wang W.** (2016), Flow measurement method based on a fringing field capacitor structure, *Electronics Letters*, 52(21), 1771-1772.
17. **Luo Z., Chu J., Shen L., Hu P., Zhu H., Hu L.** (2014), Measurement of underwater vibration by ultrasonic speckle stroboscopic technique. *Measurement*, 47, 938-945.
18. **Malan S., Greco C., Tisseur R., Bari F.** (2017), Parameters Estima- tion of Hydraulic Circuit Head Losses for Virtual Sensor Design, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(4), 1345-1358.
19. **Marick S., Bera S.K., Bera S.C.** (2014), A modified technique of flow transducer using Bourdon tube as primary sensing element, *IEEE Sensors Journal*, 14(9), 3033-3039.
20. **Mozuras A.** (2017), Vibration measurement with nonlinear converter in the presence of noise, *Journal of Sound and Vibration*, 407, 309- 331.
21. **Navada B.R., Santhosh K.V., Mazhar A., Singh A.K.,** (2017), July. Entwurf eines Kalman-Beobachters zur Schätzung des Zuflusses, *International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, 1010-1014).
22. **Norgia M., Pesatori A., Donati S.** (2016), Compact laser- diode instrument for flow measurement, *IEEE Transactions on Instrumenta- tion and Measurement*, 65(6), 1478-1483.
23. **Pecly J.O.G., Fernandes S.R.C.** (2017), Ancillary device for flow rate measurement using dye tracer technique, *Flow*

24. **Qiu Q., Lau D.** (2018), Measurement of structural vibration by using optic-electronic sensor, *Measurement*, 117, 435-443.
25. **Qiu Z.C., Wang X.F., Zhang X.M., Liu J.G.** (2018), A novel vibration measurement and active control method for a hinged flexible two-connected piezoelectric plate, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 107, 357-395.
26. **Santhosh K.V., Roy B.K.** (2016), A Practically validated intelligent calibration circuit using optimized ANN for flow measurement using venture, *Jr. of The Institution of Engineers (India): Series B*, 97 (1), 31-39.
27. **Schantz C., Donnal J., Sennett B., Gillman M., Muller S., Leeb, S.** (2015), Water nonintrusive load monitoring, *IEEE Sensors Journal*, 15(4), 2177-2185.
28. **Sinha S., Banerjee D., Mandal N., Sarkar R., Bera S.C.** (2015), Design and implementation of real-time flow measurement system using Hall probe sensor and PC-based SCADA, *IEEE Sensors Journal*, 15(10), 5592-5600.
29. **Son K.S., Jeon H.S., Park J.H., Park J. W.** (2015), Vibration displacement measurement technology for cylindrical structures using camera images, *Nuclear Engineering and Technology*, 47(4), 488-499.
30. **Yasuda A., Hasegawa S., Pohtala J.V., Miyazaki T.** (2015), Amplitude measurement of micro-vibration with robust optical interferometer systems, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126(23), 4577-4580.
31. **Zin M.M.M., Zaw M.A., Zaw M.N.** (2009), Design and Implementation of Active Band-Pass Filter for Low Frequency RFID (Radio Frequency Identification) System, *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong*.