

# Auswirkungen von hydraulischen Störungen auf Durchflusssysteme im Abfluss offener Kanäle

Laurent Sollic (Eppingen, Straßburg/Frankreich), José Vazquez und Matthieu Dufresne (Straßburg/Frankreich)

## Zusammenfassung

Die Installation von Durchflussmessungen in offenen Kanälen stellt eine Herausforderung für die Betreiber städtischer Entwässerungssysteme dar. So muss die Messtechnik teilweise unter widrigen, durch hydraulische Störungen beeinflussten Umständen wie zum Beispiel Kanalkrümmungen oder -abzweigungen eingebaut werden. Die vorliegende Studie regt die Verwendung geprüfter numerischer Simulationen zur Nachbildung virtueller Durchflusssysteme mit individuellen Charakteristika an. Bei dem hier untersuchten Störeinfluss handelte es sich um eine Krümmung eines offenen Kanals. Das Resultat dieser Studie verdeutlicht, dass es für die Hersteller von Durchflusssystemen unabdingbar ist, spezifische hydraulische Besonderheiten und Messtechniken miteinander in Einklang zu bringen, um aussagekräftige Messergebnisse zu erreichen. Ohne hydraulische Betrachtung kann der Einbau einer Durchflussmessung im Abstand von fünfmal innerer Durchmesser (DN) nach der Krümmung zu einer Messwertabweichung von 10 bis 15 Prozent, bezogen auf die vorliegende mittlere Durchflussgeschwindigkeit führen. Andererseits kann durch die Kombination dreier Sensoren und einer numerikbasierten Modellierung unter ansonsten gleichen Bedingungen eine Messwertabweichung unter 5 Prozent erreicht werden.

**Schlagwörter:** Entwässerungssysteme, Kanal, offenes Gerinne, Krümmung, Durchflussmessung, Strömungsmechanik, Strömungssimulation, Computational Fluid Dynamics, voll ausgebildete Strömung

DOI: 10.3242/kae2015.09.001

## Abstract

### Effects of Hydraulic Malfunctions on Throughflow Measurement Systems in the Outflow of Open Sewers

The setting up of throughflow measurement in open sewers represents a challenge for the operators of municipal drainage systems. For example, the measurement instrumentation has to be installed in part under adverse conditions influenced by hydraulic malfunctions such as, for example, sewer bends or branch connections. The study presented here encourages the employment of tested numerical simulations for the replication of virtual throughflow measuring devices with individual characteristics. With the disturbance investigated here one is concerned with a bend of an open sewer. The findings of the study make it clear that it is indispensable for manufacturers of throughflow measurement systems to harmonise specific hydraulic special features and measurement instrumentation with each other in order to achieve meaningful measurement results. Without hydraulic consideration the installation of a throughflow measurement system with the separation of five times the internal diameter (DN) from a bend can lead to a measurement error of 10 to 15 percent referred to the existing mean throughflow velocity. On the other hand, a measurement error under 5 percent can be achieved through the combination of three sensors and a numerically based modelling.

**Key words:** drainage systems, sewer, open channel, bend, throughflow measurement, fluid mechanic, simulation of flow, computational fluid dynamics (CFD), fully non-disturbed flow

## 1 Einleitung

Der Einbau von Messsystemen ist ein wichtiger Parameter in Abwassernetzen oder im Bereich des Bewässerungsmanagements. Die meisten Kommunen und Gemeinden erhalten mit den eingesetzten Durchflussmessungen im Rahmen europäischer Wassergesetze ausreichende Ergebnisse. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich vorrangig mit Echtzeit-Durchflusssystemen für offene Kanäle. Für diesen Zweck werden hauptsächlich zwei Messverfahren eingesetzt: Mithilfe des ersten Verfahrens werden kritische Bedingungen reproduziert und eine Beziehung zwischen Abfluss und Füllstand hergestellt; das zweite Verfahren verwendet eine Korrelation zwischen lokalen

Geschwindigkeiten (entspricht einer mittleren Geschwindigkeit) und dem Fließquerschnitt. Auf dieses Thema konzentriert sich diese Abhandlung. Neuere Methoden wie das Kreuzkorrelationsverfahren [1] bieten die Möglichkeit, Einzelgeschwindigkeiten orts aufgelöst zu messen. Sollen mithilfe dieser Technologien akzeptable Genauigkeiten erzielt werden, besteht das Hauptproblem in der Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit aus den Einzelgeschwindigkeiten. Die erwähnten Messsysteme sind unter den verschiedensten Bedingungen bei nicht entwickelten bis voll ausgebildeten Strömungen eingebaut. Hauptsächlich finden sie sich in den Übergangsbereichen zwi-

schen hydraulischer Störung und voll ausgebildeter Strömung. Ziel dieses Artikels ist es, die Auswirkungen dieser widrigen Umstände auf bereits verbaute Durchflusssysteme (Nivus GmbH) auszuwerten.

Die Auswirkungen von Störungen auf die Durchflussmessung in offenen Kanälen auszuwerten, erfordert profunde Kenntnisse sowohl der physikalischen Aspekte, die die Strömung in offenen Kanälen unter voll ausgebildeten Bedingungen beeinflussen, als auch der Störung selbst. Die lückenhafte Kenntnis der Bedingungen innerhalb der Übergangsströmungen an den Messstellen muss mit der Auswertung riesiger Datenmengen kompensiert werden. Um experimentell beobachtete Verhältnisse in offenen Kanälen mit Krümmungen nachbilden zu können, werden von den Autoren Methoden aus dem Bereich der numerischen Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics) angewendet. Nach erfolgreicher Reproduktion wird dann das Verhalten des Kreuzkorrelationsmessgeräts (mit einem oder mehreren Sensoren) unter Übergangsbedingungen simuliert. Das Ergebnis der Simulation zeigt die Auswirkungen der Störung auf die Messgenauigkeit.

## 2 Verfahren

### 2.1 Hydrodynamik in offenen Kanälen

Charakterisierung von Strömungsbedingungen

In offenen Kanälen mit eingebauten Messsystemen können unterschiedliche Strömungsbedingungen beobachtet werden (Abbildung 1):

- voll ausgebildete Strömung: entspricht dem Zustand der Primärströmung (bzw. der Sekundärströmungen) ohne Änderung der Strömungsrichtung. Dieser Zustand ist gut bekannt [2, 3].
- gestörter offener Kanal: entspricht den unmittelbar an der Störung beobachteten hydrodynamischen Phänomenen, in diesem Fall ein gekrümmter offener Kanal mit gut bekannten Bedingungen [4]
- Übergangströmung: entspricht dem Zustand der Strömung zwischen Störung und voll ausgebildeter Strömung. Die Kenntnisse über diesen Strömungszustand sind unzureichend und sollen durch den Einsatz von CFD besser untersucht und beschrieben werden.

Voll ausgebildete Strömung in offenen Kanälen

Voll entwickelte Strömungen in offenen Kanälen können komplexe Strukturen ausbilden. Dabei hängt das primäre Strö-

Strömungszustände	Störung	Übergang	voll ausgebildet
Kenntnis der Literatur	hoch	niedrig	sehr hoch
praktische Anwendung	nie	hoch	wenige

Abb. 1: Verschiedene Strömungszustände in offenen Kanälen und ihre praktische messtechnische Bedeutung

mungsfeld von einer Reihe physikalischer Parameter ab (Füllstand, Froude-Zahl, Rauigkeit ...). Nicht zu vernachlässigen ist natürlich auch die direkte Beziehung zu den Sekundärströmungen. Es wird zwischen zwei Arten von Sekundärströmungen unterschieden: die sogenannte „1. Art nach Prandtl“ mit charakteristisch gestreckter Wirbelbildung, zu beobachten beispielsweise in gekrümmten Kanälen; die „2. Art nach Prandtl“ in geraden Kanälen: Sie entsteht aufgrund der geometrischen Randbedingungen, Beziehung zwischen den Grenzflächen (Zusammenhang zwischen Füllhöhe, Kanalbodenbreite und Kanalwandhöhe), Seitenverhältnis und Anisotropie der Turbulenz [3]. Bei geraden, offenen Kanälen, in denen die Mehrzahl der Messstellen eingebaut ist, lässt sich die Anzahl der Unbekannten auf die Auswirkungen auf Froude-Zahl, Rauigkeit und Seitenverhältnis (in Rechteckkanälen  $A_r = B/h_{A,r} = S(h)/h^2$  [3] begrenzen.

Diese Art Strömungen tritt hauptsächlich in den Eckbereichen (Berührungspunkt zwischen Kanalwand und -boden) auf. Dort finden sich zwei verschiedene Arten von Wirbeln: der freie Oberflächenwirbel zwischen Seitenwand und freier Oberfläche sowie der Bodenwirbel zwischen dem Kanalboden und dem Kanalmittelpunkt. Diese Strömungswirbel üben einen starken Einfluss auf das primäre Strömungsfeld aus, wobei die Hauptauswirkung darin besteht, dass die maximale Strömungsgeschwindigkeit nicht (immer) direkt an, sondern unterhalb der freien Oberfläche zu beobachten ist; das sogenannte Dip-Phänomen [3]. Andere Formen von Sekundärströmungen finden sich weiter von den Eckbereichen entfernt. Diese einer idealen Zelle sehr nahe kommenden Strömungen haben besondere Auswirkungen sowohl auf das Strömungsfeld als auch auf die Verteilung der Scherspannung [3]. Auch die Kanalgeometrie beeinflusst die Struktur von Sekundärströmungen wesentlich (Abbildung 2). Bei trapezförmigen Kanälen etwa entsteht in der Nähe des Zusammentreffens von freier Oberfläche und Kanalwand ein zusätzlicher Wirbel [2]. Im Fall zusammengesetzter, gerader und offener Kanäle tritt Wirbelbildung im Hauptkanal auf, in Krümmungen und nahe des Übergangs jedoch zwischen Hauptkanal und der Krümmung [5].

Gekrümmte offene Kanäle

Die Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Strömung in einer Krümmung in offenen Kanälen wird durch einen Haupt-Sekundärstrom gekennzeichnet. Dieser Strömungskreislauf [4] verteilt die Geschwindigkeiten um, beeinflusst den Transport von Sedimenten und verändert die Geometrie der Krümmung.

Bei Krümmungen in offenen Kanälen (Abbildung 3) erstreckt sich eine besondere Sekundärströmung über einen gro-

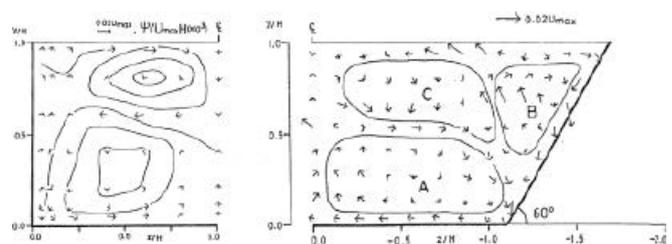


Abb. 2: Sekundärströmungen in geraden offenen Kanälen (rechteckig und trapezförmig)

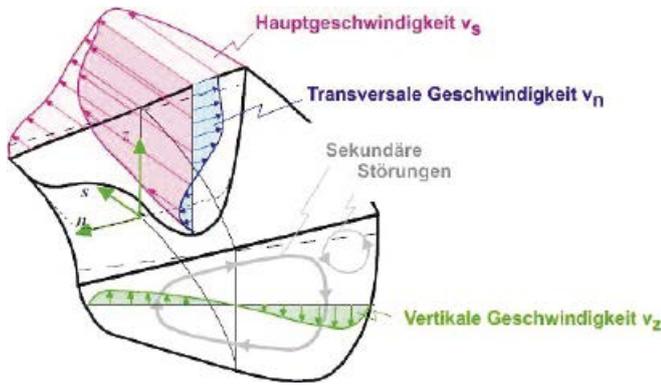


Abb. 3: Strömungsverhältnisse in einer Krümmung im offenen Kanal [4]

ßen Teil des Fließquerschnitts: Diese Strömung wird oft als Zentralbereichszelle bezeichnet [4, 6]. Diese Zentralbereichszelle wird oft als Resultat des Ungleichgewichts zwischen der dort wirkenden Zentrifugalkraft und dem in Querrichtung dazu auftretenden Druckgradienten beschrieben. Gleichzeitig ist diese Zelle eine gut untersuchte Struktur im Bereich der gekrümmten offenen Kanäle. Eine weitere Zelle kann in der Nähe der äußeren Zone beobachtet werden. Obwohl verhältnismäßig klein und schwach ausgebildet [4, 6], erfüllt diese Zelle doch eine wichtige Funktion zur Erhaltung der äußeren Zone. Die genannten Sekundärströmungen beeinflussen daher die Umverteilung der Geschwindigkeiten sowie die Scherspannung an der Kanalsohle dramatisch.

#### Übergangsströmung

Übergangsströmungen bieten in messtechnischer Hinsicht nur begrenzt Studienmaterial. Es gibt nur wenige Untersuchungen auf diesem Gebiet [7]. Erforscht wurden dabei in erster Linie folgende Punkte:

- die für die Ausbildung einer voll entwickelten Strömung benötigte Strecke
- die Auswertung des Singularitätsindex [8] zur Bestimmung des Grades der Verschlechterung des Strömungszustands

Die Resultate wurden leider bis heute bei im Handel erhältlichen Durchflussmesssystemen nicht in der Praxis berücksichtigt. Aufgrund fehlender Kenntnisse mussten diese Strömungszustände mithilfe neuester Verfahren als numerische Simulationen (CFD) reproduziert werden.

#### 2.2 Nachbildung von Übergangsströmungen in offenen Kanälen mithilfe numerischer Strömungsmechanik

Die Nachbildung von Strömungen in offenen Kanälen basiert auf folgender Annahme: Wenn sich gestörte sowie voll ausgebildete Strömungszustände mithilfe gegebener numerischer Werte ausreichend genau reproduzieren lassen, dann können mit diesen Werten ebenso Übergangsströmungen mit vergleichbarer Genauigkeit reproduziert werden.

#### Numerische Werte

Für die Simulation eines Geschwindigkeitsfelds mittels CFD-Software ist es erforderlich, ein virtuelles Messnetz über Teile des Rechteckgerinnes zu legen. Zusätzlich sind ein speziell angepasstes Turbulenzmodell, ein Modell zur Reproduktion der Wasseroberfläche sowie weitere spezifische numerische Anpassungen notwendig. Angestrebt wird die Reproduktion eines voll entwickelten Strömungszustands. Um eine voll ausgebildete Strömung zu erreichen, ist ein ausreichend langer Kanal sowohl auf- als auch abwärts der Randbedingungen (Zulauf und Auslauf) notwendig. Wir empfehlen einen Wert von  $240 R_h$  [1], um eine voll ausgebildete Strömung nachzubilden. Diese Bedingung wird sowohl vor als auch hinter dem Messpunkt angewendet. Benutzt wurde die Software ANSYS-FLUENT.



## JUNG PUMPEN MULTICUT PUMPEN MIT SCHNEID

**MultiCut** macht alles kurz und klein, was nicht in Ihre Pumpe soll. Ihre erste Wahl für die Druckentwässerung.

Hier geht's zum Video



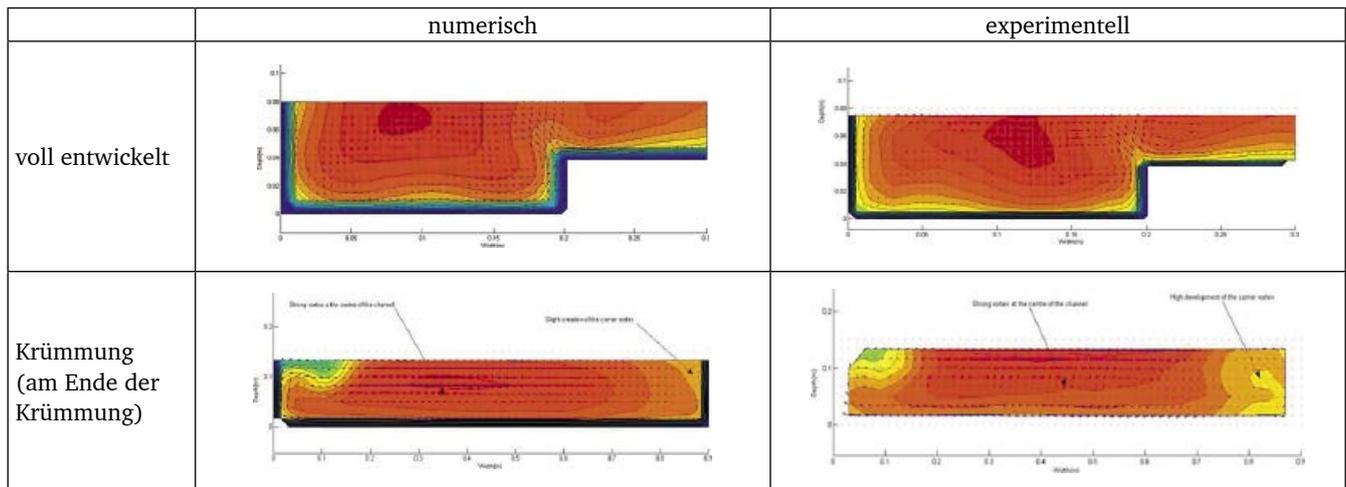


Abb. 4: Vergleich zwischen Simulation und Experiment bei gekrümmten offenen Kanälen und voll ausgebildeter Strömung

	numerische Unsicherheit	experimentelle Unsicherheit	Fehler absolut
voll ausgebildete Strömung	2,4 %	4,0 %	3,1 %
gekrümmter offener Kanal	3,2 %	5,0 %	4,5 %

Tabelle 1: Vergleich numerischer und experimenteller Ergebnisse

Bei der Anwendung des Messnetzes muss besonderes Augenmerk auf die erste Zelle in Wandnähe gerichtet werden, da hier Standard-Wandfunktionen zum Einsatz kommen. Der Wert  $y_+$  ( $y_+ = y \times u_* / \nu$ ) in der Mitte der ersten Zelle sollte sich gemäß der Softwarerichtlinie im Bereich 30 bis 300 bewegen. Somit wird für jede Simulation die erste Zelle hinsichtlich der Kanalcharakteristika, des Füllstands, der mittleren Geschwindigkeit sowie der Rauigkeit angepasst. Es existiert eine große Auswahl an Turbulenzmodellen wie zum Beispiel  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  oder das RSM-Modell. Turbulenzen in geraden, offenen Kanälen verhalten sich anisotrop [3]: Die Schließung der Navier-Stokes-Gleichung bei Benutzung der Reynolds-Spannungen benötigt daher einen Schließungsansatz zweiter Ordnung, um deren Abhängigkeit mit in die Richtung zu integrieren. Als Konsequenz daraus folgt, dass die Reproduktion der Bewegungen von Sekundärströmungen die Verwendung anisotroper Modelle erfordert. Bardiaux et al. [9] zeigen die Vorteile bei der Benutzung eines anisotropen Modells wie zum Beispiel dem RSM-Modell (Konstanten werden mithilfe von Werten kommerzieller Software angepasst) im Vergleich zum  $k-\varepsilon$ -Modell. Aus diesem Grund wird für die vorliegende Studie das RSM-Modell herangezogen. Für die Simulation freier Oberflächen stehen zwei Modelle zur Verfügung: das VOF-Modell sowie ein Symmetrieebenenmodell. Beim VOF-Modell handelt es sich um ein System mit Oberflächenverfolgung, das auf feste Eulersche Koordinaten angewendet wird. Dieses Modell ist für die Verwendung mit zwei oder mehr nicht mischbaren Flüssigkeiten konzipiert, wobei die Lage der Trennschichten zwischen den Flüssigkeiten von besonderem Interesse ist. Beim VOF-Modell teilen sich alle Flüssigkeiten ein einzelnes System von Impulsgleichungen, und der Volu-

menanteil jeder Flüssigkeit wird innerhalb jeder Rechenzelle durch den gesamten Definitionsbereich hindurch verfolgt. Beim Symmetrieebenenmodell wird die Wasseroberfläche als symmetrische, ebene Fläche betrachtet und zur Modellierung der Trennschicht zwischen Wasser und Luft herangezogen. Dies impliziert allerdings eine nicht deformierte Wasseroberfläche, was bei frei fließenden Oberflächen im Allgemeinen nicht der Fall ist. Nach einem Vergleich beider Modelle schlussfolgerten Bardiaux et al. [9], dass das Dip-Phänomen lediglich beim VOF-Modell auftritt.

#### Gegenüberstellung mit experimentellen Ergebnissen

Die numerischen Werte wurden anhand zweier verschiedener Experimente getestet: Für voll ausgebildete Strömungsverhältnisse wurden von Tominaga und Nezu [5] durchgeführte Experimente, für gekrümmte offene Kanäle von Tominaga und Nagao [6] durchgeführte Experimente zum Vergleich herangezogen. Der Vergleich der Geschwindigkeitsfelder ist in Abbildung 4 dargestellt.

Basierend auf einer Empfindlichkeitsanalyse der Gittermaske wurde der numerische Fehler unter Verwendung einer  $x^2$ -Extrapolation bei einem Erwartungsbereich von 99 % [10] zur Unsicherheit erweitert. Tabelle 1 zeigt die unterschiedlichen Ergebnisse entsprechend den simulierten Konfigurationen. Die Unsicherheiten bezüglich der Experimente wurden geschätzt. Experiment und Simulation wurden dementsprechend in Tabelle 1 (absoluter Fehler) verglichen. Unter Berücksichtigung von Unsicherheiten (numerisch und experimentell) stimmen diese mit dem absoluten Fehler überein.

	$A_r$	$F_r$	R/B	Winkel
numerische Simulationen	$1 < A_r < 5$	$0,4 < F_r < 1,4$	$1 < R/B < 10$	$30^\circ < \alpha < 90^\circ$

Tabelle 2: Datengrundlage offene Kanäle

# NivuFlow 750 hochgenaue Durchflussmessung



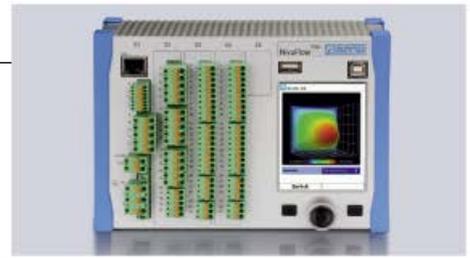
**Die passende Lösung für jede Applikation. Praxiserprobte Messsysteme, die genau Ihren Anforderungen entsprechen. Messsysteme, die genau das messen was sie sollen, zuverlässig und genau – auch unter schwierigen Bedingungen. Das ist unser Anspruch!**

Das NivuFlow 750 ist das Top-Gerät für den universellen Einsatz bei Teil- und Vollfüllung im Abwasser. Die intuitive Bedienung ermöglicht eine schnelle und einfache Inbetriebnahme. Integrierte numerische Durchflussmodelle gewährleisten genaueste Durchflussberechnungen auch bei schwierigen Applikationen. Rufen Sie uns an!



### DURCHFLUSSMESSUNG

Universeller Messumformer NivuFlow 750 mit intuitivem Bedienkonzept. Die konsequente Weiterentwicklung unserer bewährten Messumformerfamilie.



### STRÖMUNGSÜBERWACHUNG

Der NivuGuard 2 - Sensor überwacht die Strömung in vollgefüllten Rohrleitungen. Durch die Clamp-On Technik kann der Sensor sehr einfach und schnell von außen installiert werden.



### DURCHFLUSSMESSUNG

NivuSmart Q ist ein neuartiges Messverfahren für die Durchflussfassung mit zwei parallelen Füllständen. Mit Hilfe einer messstellenspezifischen Gleichung kann zuverlässig und genau der Durchfluss berechnet werden.



### FÜLLSTANDSMESSUNG

NivuLevel 150 ist ein autarkes Füllstandsmesssystem für den Einsatz an Messstellen ohne Stromversorgung. Der minimale Energiebedarf ermöglicht sehr lange Standzeiten.



### SCADA/FERNWIRTECHNIK

Die Prozessleit- und Fernwirksoftware NICOS 2.0 bietet passgenaue Lösungen für die Wasserwirtschaft. Sie ermöglicht maximale operative Effizienz von kompletten Anlagen und Systemen durch optimale Informationen und eine hohe Benutzerfreundlichkeit.



Mehr Infos finden Sie unter [www.nivus.de](http://www.nivus.de)  
oder rufen Sie uns einfach an und vereinbaren einen Beratungstermin.

**Telefon: +49(0)7262 9191-0**

Anzahl Sensoren	ein Sensor		drei Sensoren	
	mittlerer absoluter Fehler [%]	Standardabweichung [%]	mittlerer absoluter Fehler [%]	Standardabweichung [%]
1B	9,6 %	11,1 %	3,6 %	3,1 %
3B	7,5 %	6,4 %	3,5 %	3,4 %
5B	7,1 %	5,0 %	4,1 %	4,0 %
10B	6,6 %	3,3 %	4,2 %	4,3 %
20 B	4,2 %	3,5 %	3,6 %	3,5 %
voll entwickelt	2,4 %	2,5 %	2,4 %	2,5 %

Tabelle 3: Einsatz des Sensors unter simulierten Bedingungen (Modell mit Mittelwertbildung)

Anzahl Sensoren	ein Sensor		drei Sensoren	
	mittlerer absoluter Fehler [%]	Standardabweichung [%]	mittlerer absoluter Fehler [%]	Standardabweichung [%]
1B	3,5 %	7,6 %	2,0 %	2,5 %
3B	2,8 %	3,4 %	2,6 %	3,4 %
5B	2,5 %	3,8 %	1,9 %	2,3 %
10B	1,9 %	2,4 %	0,9 %	0,9 %
20 B	1,7 %	1,4 %	0,7 %	0,5 %
Voll entwickelt	0,9 %	0,5 %	0,6 %	0,3 %

Tabelle 4: Einsatz des Sensors unter simulierten Bedingungen (entwickeltes Modell)

Entwicklung einer Datengrundlage

Mithilfe bekannter numerischer Werte wurden unterschiedliche Konfigurationen mit Krümmungen in offenen Kanälen als stromaufwärts liegende Störung simuliert. Dies wird in Tabelle 2 dargestellt. Die Übergangszone deckt dabei einen Bereich von ca.  $50 \times \text{Breite } (B)$  ab.

**2.3 Charakteristika vorhandener Durchflussmesssysteme und deren Einbindung in Übergangsströmungen**

Ziel ist die Simulation industrieller Durchflussmessgeräte am Beispiel der Nivus GmbH unter den in Tabelle 2 aufgeführten Simulationsparametern. Die getesteten Keilsensoren, welche die Fließgeschwindigkeit mithilfe der Echokorrelation messen [1], korrelieren mit der mittleren Geschwindigkeit. Externe bzw. kombinierte Füllstandssensoren liefern den Fließquerschnitt. Der Abfluss ergibt sich aus Gleichung (1).

$$Q = U_{\text{mittel}} \times A(h) \tag{1}$$

Die Technik der Echokorrelation beruht auf den Eigenschaften des Ultraschalls. Zur Bestimmung von Partikelbewegungen analysiert das Verfahren die Zeitverzögerung zwischen Aussendung und Reflexion zweier aufeinander folgender Impulse innerhalb eines definierten Volumens. Die größte Herausforderung hier besteht darin, eine geeignete Methode zur Bestimmung der Zeitverzögerung, das heißt eine Methode zur Korrelation beider Signale zu finden. In der Signalverarbeitung wird die Kreuzkorrelation eingesetzt, um die Ähnlichkeiten zweier Wellenformen zu messen.

Diese Messmethode misst die Geschwindigkeitsverteilung über 16 Schichten in einem eher praxisbezogenen Ansatz. Der Abstrahlwinkel des Sensors liegt bei  $45^\circ$ . Zwei Arten der Auswertung von Durchflussmengen seien hier vorgeschlagen. Eine einfache empirische Herangehensweise, bei der alle gemessenen

Geschwindigkeiten gemittelt werden, nennt sich „Mittelwertbildung“:

$$U_{\text{mittel}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \tag{2}$$

$N$  beschreibt die Anzahl der gesammelten Messwerte. Eine strömungstechnisch fundierte Methode besteht in der Nachbildung des Geschwindigkeitsfelds in voll ausgebildeten Bedingungen [1], der Verknüpfung örtlicher Geschwindigkeiten mit der Sensorposition, der Position jeder örtlichen Geschwindigkeit sowie den voll entwickelten Strömungsbedingungen (Sekundärströmungen) in Rechteckkanälen. Diese verifizierte Methode lässt sich mithilfe kubischer Splines auch auf mehrere Sensoren anwenden [1].

Verschiedene Sensorkonfigurationen werden in unterschiedlichen Entfernungen zur Störung anhand numerischer Voraussetzungen nachgebildet. Mithilfe der Materialcharakteristika und der Simulationen erhält man so simulierte Geschwindigkeitswerte. Bei den erhaltenen Ergebnissen finden dann zwei Methoden der Durchflussmengenberechnung Verwendung: ein Verfahren benutzt die empirische Mittelwertbildung, während ein zweites Modell die voll ausgebildeten Strömungsbedingungen nachbildet. Die berechneten mittleren Geschwindigkeiten werden dann mit den theoretischen Werten verglichen.

**3 Ergebnisse und Diskussion**

**3.1 Ergebnisse**

Die Sensoren werden mit Standardverfahren in unterschiedlichen Entfernungen zur Störung angebracht (1B, 3B, 5B, 10B, 20B). Tabelle 3 zeigt die mithilfe einfacher Mittelwertbildung erhaltenen Ergebnisse, wogegen Tabelle 4 die Resultate aus der Verwendung definierter Modelle repräsentiert

[1]. Die Höhe des Wasserspiegels betrug bei jeder Konfiguration 20 cm.

Der mittlere Geschwindigkeitsfehler entspricht in jeder Tabelle dem vorgestellten Fehler. Füllstandsfehler wurden bei der Betrachtung nicht berücksichtigt.

### 3.2 Analyse der Ergebnisse

Die in den Tabellen 3 und 4 gezeigten Ergebnisse nehmen eine Schlussfolgerung vorweg. So bietet die Anwendung der auf voll entwickelten Strömungsverhältnissen basierenden Durchflussmodelle durchweg eine höhere Genauigkeit als eine einfache Mittelwertbildung. Andererseits verringert sich der Fehler in beinahe jeder Situation mit zunehmender Entfernung von der Störung. Als weitere Aspekte lassen sich herausstellen:

- Die Paarung aus mehreren Sensoren und einem Modell in voll ausgebildeter Strömung erzielt bessere Resultate und zeigt keinerlei größeren Abhängigkeiten von der Entfernung
- Die Konfiguration mit einem Sensor und einem Modell bietet gleichwertige Ergebnisse wie bei der Verwendung mehrerer Sensoren. Dennoch bleibt die Standardabweichung höher.

Durchflussmessungen in gestörten Strömungsverhältnissen werden in vielerlei Hinsicht beeinflusst. So haben geometrische Gegebenheiten größten Einfluss auf die Messung von Durchflussmengen, wobei der Einsatz von Modellen zur Nachbildung physikalischer Aspekte die Messunsicherheit verringert. Hinsichtlich der Integration mit der Störung selbst verknüpfter Aspekte bietet die Verwendung zusätzlicher Sensoren eine Option zur Reduzierung von Messunsicherheiten. Die Kombination beider Techniken stellt eine einfache Möglichkeit dar, akzeptable Messunsicherheiten bei der Messung von Durchflussmengen zu erhalten.

## 4 Schlussfolgerung und Aussichten

Diese Studie regt die Verwendung numerischer Simulationen für die Auswertung von Messunsicherheiten bei Abflussmessungen an. Bei den Übergangszonen und damit den Bereichen, in dem Durchflussmesssysteme eingebaut sind, handelt es sich um komplexe Gebiete, in denen spezielle Phänomene beobachtet werden können und die daher nur sehr schwer auf einfache Art und Weise nachzubilden sind. Der Einsatz numerischer Modelle (CFD) ist ein Ansatz zu deren Quantifizierung. Nach Erläuterung der in offenen Kanälen beobachteten Phänomene (mit Krümmungen und in voll ausgebildeten Verhältnissen) musste sich die CFD mit den Experimenten auseinandersetzen. Nach der Validierung wurde eine Datenbibliothek erstellt und die extrahierten Daten auf vorhandene Durchflussmesssysteme korreliert. Die Ergebnisse sind einfach. Die Korrelation zusätzlicher Sensoren sowie die Modellierung des Durchflusses verringert Messunsicherheiten deutlich. Werden hydraulische Gegebenheiten nicht integriert, wirkt sich dies negativ auf die Genauigkeit aus.

Eine Perspektive ist der Einbau von Durchflussmesssystemen unter gleichwertigen Bedingungen sowohl im Labor als auch vor Ort zur Auswertung der damit verbundenen Fehler. Diese numerische Studie bietet vergleichbare Ergebnisse.

## Dank

Die Autoren danken Dr. *Michael Teufel* für die deutsche Korrektur.

## Literatur

- [1] Sollicc L.: *Real time flow rate modelling in disturbed conditions from velocity profilers*, Dissertation, Université de Strasbourg, 2013
- [2] Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K., Nakagawa, H.: Three-dimensional turbulent structure in straight open-channel flows, *J. Hydraul. Res.* 1989, 149–173
- [3] Nezu, I., Nakagawa, H.: *Turbulence in open channels flows*, Balkema, Rotterdam, 1993
- [4] Blanckaert, K.: *Flow and turbulence in sharp open channel*, Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002
- [5] Tominaga, A., Nezu, I.: Turbulent structure in compound open-channel flows, *J. Hydraul. Eng.* 1991, 21–41
- [6] Tominaga, A., Nagao, M.: Secondary flows structures in bends of narrow open channels with various cross sections, *Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Hydrosience and Engineering*, S. 9, Seoul, Korea, 2000
- [7] Mignot, E., Bonakdari, H., Knothe, P., Lipeme-Kouyi, G., Bessette, A., Rivière, N., Bertrand-Krajewski, J.-L.: Experiments and 3D simulations of flow structures in junctions and their influence on location of flowmeters, *Water Sci. Technol.* 2012, 66 (6), 1325–1332
- [8] Bonakdari, H.: *Modeling of free flows in sewer systems: application to the measurement point conception*, Dissertation, Université de Caen, 2006
- [9] Bardiaux, J., Vazquez, J., Mosé, R.: *Assessment of the velocity three-dimensional distribution in a free surface flow*, La Houille Blanche N°4, 99–103, 2007
- [10] Roache, P.: Quantification of uncertainty in Computational Fluid Dynamics, *Annual Revision of Fluid Mechanics* 1997, 123–160

## Autoren

Dr. Laurent Sollicc<sup>1, 2)</sup>

Prof. Dr. José Vazquez<sup>2, 3)</sup>

Dr. Matthieu Dufresne<sup>2, 3)</sup>

<sup>1)</sup> Nivus GmbH

Im Täle 2, 75031 Eppingen

<sup>2)</sup> ICube UMR 7357 – Laboratoire des sciences de l'ingénieur,

de l'informatique et de l'imagerie

Département Mécanique, Équipe Mécanique des Fluides

2 Rue Boussingault

67000 Strasbourg, Frankreich

<sup>3)</sup> ENGEES – École Nationale du Génie de l'Eau et de

l'Environnement de Strasbourg

1 Quai Koch

67000 Strasbourg, Frankreich

E-Mail: laurent.sollicc@nivus.com

