

Untersuchung störungsbehafteter Strömungsvorgänge im Kanalnetz und deren Auswirkung auf die Durchflussmessung

S. Ebbert^{*1}, N. Voßwinkel¹, S. Rechten¹, M. Uhl¹, R. Mohn¹

¹Fachhochschule Münster, Institut für Wasser•Ressourcen•Umwelt (IWARU), Corrensstr. 25, FRG-48149 Münster

*Email des korrespondierenden Autors: simon.ebbert@fh-muenster.de

Kurzfassung Im Rahmen des Forschungsvorhabens FLUKZ (Durchflussmessung im Bereich gestörter Strömungsprofile im Kanalnetz) wurde eine Systematik entwickelt, um die Durchflussberechnung aus störungsbehafteten Strömungsvorgängen zu kategorisieren. Im durch PIV-Messungen validierten, numerischen Modell wurden Grundvarianten mit variablen Parametern untersucht, um die Entwicklung des Geschwindigkeitsprofils für unterschiedliche hydraulische Zustände im Kanalnetz beschreiben zu können.

Die Ergebnisse wurden mittels eines dimensionslosen Indikators über die Fließlänge unterhalb der Störung dargestellt. Der Indikator stellt die Abweichung einer Durchflussberechnung nach dem Fünfpunktverfahren (vgl. DIN EN ISO 748 [2005]) vom Solldurchfluss dar. Die Indikatorverläufe gestatten die Beurteilung, inwiefern die Durchflussberechnung mittels eines vertikalen Geschwindigkeitsprofils nach einer Störung noch durch Asymmetrien des Profils beeinflusst ist.

Es wurden qualitative Empfehlungen und quantitativ anwendbare Regeln abgeleitet, die den Einfluss von Störungen infolge von Zusammenflüssen auf die Genauigkeit von Durchflussmessungen minimieren.

Schlagwörter: Durchflussmessung, numerische Simulation, Indikator, Geschwindigkeitsprofil, Unsicherheit

1 EINLEITUNG

Messdaten des Durchflusses bilden die Grundlage für Planungen, Investitionsentscheidungen und den Betrieb in der Siedlungswasserwirtschaft und der Wasserwirtschaft. Zur Messung des Durchflusses in teilgefüllten Kanalisationsnetzen werden Messgeräte eingesetzt, die nach der Geschwindigkeitsflächenmethode arbeiten (DWA-M 181 [2011]). Die Geschwindigkeiten werden entweder punktuell innerhalb eines Kontrollvolumens oder entlang einer definierten Messstrecke ermittelt (Kölling/Valentin [1995]). Mittels gerätespezifischer Umrechnungsalgorithmen wird von den gemessenen örtlichen Fließgeschwindigkeiten auf eine für den durchflossenen Querschnitt repräsentative mittlere Geschwindigkeit geschlossen. Als wesentliche Voraussetzung der Berechnungen wird üblicherweise ein annähernd symmetrisches Geschwindigkeitsprofil angenommen. Damit kommt der Einbauposition der Messgeräte nach strömungsbeeinflussenden Störungen eine zentrale Bedeutung zu.

Ein absolut ungestörtes und symmetrisches Geschwindigkeitsprofil ist in der Realität selten. Störquellen (z.B. seitliche Einmündungen, Bögen, Gefälleänderungen, Entlastungsschwellen, Schachtbauwerke) erzeugen Asymmetrien im Geschwindigkeitsfeld der Strömung. Hierdurch wird die Durchflussberechnung aus gemessenen Geschwindigkeiten im Vertikalprofil der Rohrachse erheblich erschwert (vgl. Uhl et al. [2010]).

2 MATERIAL UND METHODEN

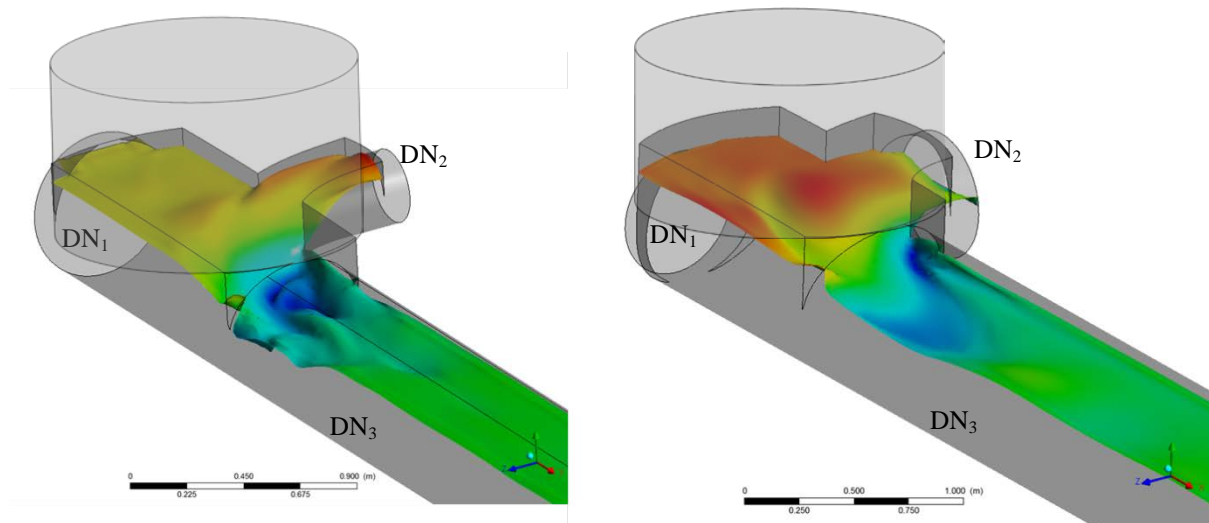


Abbildung 1: Variante „Zusammenfluss im Schacht“ (links: $DN_2/DN_1 = 0,5$; rechts: $DN_2/DN_1 = 1$), (Simulationsergebnis)

Tabelle 1: Durchgeführte Untersuchungen

Nr.	DN_1 (mm)	DN_2 (mm)	DN_3 (mm)	DN_2/DN_1 (-)	Q_3 (% Q_v)	Q_3 (l/s)	UW- RB (% h_n)	Q_2/Q_1 (-)
1	600	300	600	50%	$0.05 \cdot Q_v$	16.615	100% h_n	0.15
2	600	300	600	50%	$0.50 \cdot Q_v$	166.15	100% h_n	0.15
3	600	300	600	50%	$0.90 \cdot Q_v$	299.1	100% h_n	0.15
4	600	300	600	50%	$0.05 \cdot Q_v$	16.615	100% h_n	0.5
5	600	300	600	50%	$0.50 \cdot Q_v$	166.15	100% h_n	0.5
6	600	300	600	50%	$0.90 \cdot Q_v$	299.1	100% h_n	0.5
7	1000	500	1000	50%	$0.05 \cdot Q_v$	63.41	100% h_n	0.5
8	1000	500	1000	50%	$0.50 \cdot Q_v$	634.1	100% h_n	0.5
9	600	600	800	100%	$0.05 \cdot Q_v$	35.3	100% h_n	0.5
10	600	600	800	100%	$0.50 \cdot Q_v$	353.45	100% h_n	0.5
11	600	600	800	100%	$0.90 \cdot Q_v$	636.2	100% h_n	0.5
12	600	300	600	50%	$0.05 \cdot Q_v$	16.6	125% h_n	0.5
13	600	300	600	50%	$0.50 \cdot Q_v$	166.15	125% h_n	0.5
14	600	300	600	50%	$0.90 \cdot Q_v$	299.1	125% h_n	0.5
15	600	600	800	100%	$0.05 \cdot Q_v$	35.3	100% h_n	1
16	600	600	800	100%	$0.50 \cdot Q_v$	353.45	100% h_n	1
17	600	600	800	100%	$0.90 \cdot Q_v$	636.2	100% h_n	1
18	600	600	800	100%	$0.05 \cdot Q_v$	35.3	125% h_n	1
19	600	600	800	100%	$0.50 \cdot Q_v$	353.45	125% h_n	1
20	600	600	800	100%	$0.90 \cdot Q_v$	636.2	125% h_n	1

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist die Variante “Zusammenfluss im Schacht” (Abbildung 1) untersucht worden. Diese widmet sich dem scheinbar gleichartigen Zusammenfluss zweier Kanäle in einem Schacht, für die unterschiedliche geometrische und hydraulische Randbedingungen untersucht worden sind. Das Gefälle des Hauptkanals DN₃ beträgt $I_{so} = 2 \text{ ‰}$. Für die Konfiguration “Zusammenfluss im Schacht” (s. Abbildung 1) sind 20 Untersuchungen (s. Tabelle 1) durchgeführt worden.

In äquidistanten Abständen zur Störung wurden Geschwindigkeitsprofile ermittelt, an denen die Wirkung ihrer Asymmetrie auf die Durchflussberechnung anhand eines Indikators bestimmt wurde. Der Indikator lehnt sich an das Fünfpunktverfahren (vgl. DIN EN ISO 748 [2005]) an. Das Fünfpunktverfahren wurde ausgewählt, da es ein herstellerunabhängiges Verfahren ist, den Durchfluss zu ermitteln und, im Vergleich zu den übrigen Verfahren aus DIN EN ISO 748 [2005], die kleinsten Abweichungen vom Soll-Durchfluss liefert. Die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit aus dem Fünfpunktverfahren erfolgt an einer Messlotrechten in der Mitte des durchströmten Querschnitts.

Mittlere Fließgeschwindigkeit v_m mittels Fünfpunktverfahren:

$$v_m = 0,1 * (v_{WSP} + 3 * v_{0,2} + 3 * v_{0,6} + 2 * v_{0,8} + v_{Sohle})$$

Durchflussberechnung: $Q_{IST} = v_m * A$

$$Indikator = 1 - (Q_{soll} / Q_{IST})$$

mit:

v_m = mittlere Fließgeschwindigkeit an der Messlotrechten

v_x = Geschwindigkeit am Punkt x auf der Messlotrechten (z.B.: $v_{0,2}$ = 20 % Fließtiefe)

v_{Sohle} = Fließgeschwindigkeit auf der Sohle (hier aufgrund Haftbed. in Numerik = 0)

v_{WSP} = Fließgeschwindigkeit am Wasserspiegel

Q_{soll} = vorgegebener Durchfluss (als Randbedingung der Simulation)

Q_{IST} = gemäß Fünfpunktverfahren berechneter Durchfluss

Negative Indikatoren deuten auf eine Unterschätzung des Durchflusses hin, während positive Indikatoren eine Überschätzung des Durchflusses bedeuten. Beträgt der Indikator null, liegt keine Abweichung vom Soll-Durchfluss vor. In Sonderfällen kann dennoch eine geringfügige Asymmetrie des Geschwindigkeitsprofils vorliegen, deren Wirkung sich jedoch aufhebt.

Die Untersuchungen sind im Maßstab 1:1 mit Hilfe der 3-dimensionalen numerischen Strömungssimulation in der Simulationsumgebung Ansys Fluent (Version 15.0) durchgeführt worden. Zur Simulation des freien Wasserspiegels wurde das VOF Model und als Turbulenzmodell das k-ε RNG Modell eingesetzt.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In Abbildung 2 ist die Entwicklung des Geschwindigkeitsprofils für die geometrische Variante DN₂/DN₁ = 0,5 (Abbildung 1 links) mit einer hydraulischen Belastung von $Q_3 = 0,05 * Q_v$ (entspricht 16,6 l/s) dargestellt. Für diesen Durchfluss zeigt das linke Bild in Abbildung 2 Normalabfluss im Kanal, das rechte Bild ein durch Rückstau überprägten Zustand.

Im Abstand 1xDN ist das Geschwindigkeitsprofil für beide Strömungszustände sehr stark gestört, was darauf zurückzuführen ist, dass der Zufluss aus dem seitlichen Kanal (DN₂) höher liegt und sich im Schacht von oben in die Hauptströmung hinbewegt. Auch im Abstand 5xDN ist das Geschwindigkeitsprofil noch sehr stark gestört. Da die Geschwindigkeitsprofile für beide Strömungszustände bis 5xDN vergleichbar sind und keine nennenswerten Differenzen im Wasserspiegel aufweisen, wirkt sich der Rückstau bei der geringen hydraulischen Belastung nicht bis zum Zusammenfluss aus. Im weiteren Verlauf lässt sich ein leichtes Pendeln des Geschwindigkeitsmaximums verzeichnen, bis sich das Geschwindigkeitsprofil für beide Strömungszustände vollständig ausbildet. Bei

der geringen hydraulischen Belastung wirkt sich der Rückstau daher nicht negativ auf das Geschwindigkeitsprofil aus.

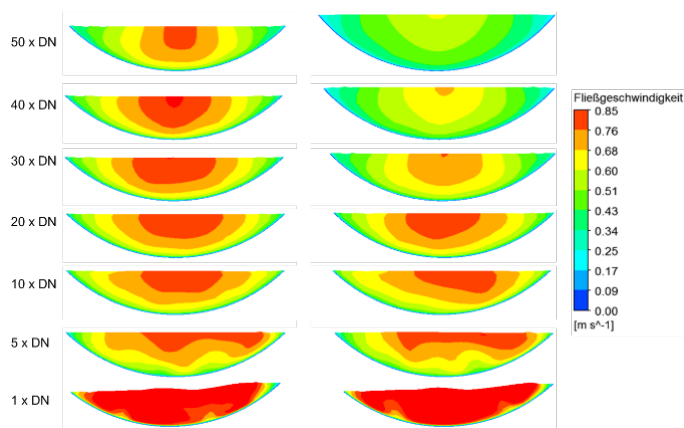


Abbildung 2: Entwicklung des Geschwindigkeitsprofils der Variante „Zusammenfluss im Schacht“ $DN_2/DN_1 = 0,5$, $Q_3 = 0,05 \cdot Q_v$ (links: ohne Rückstau; rechts: mit Rückstau)

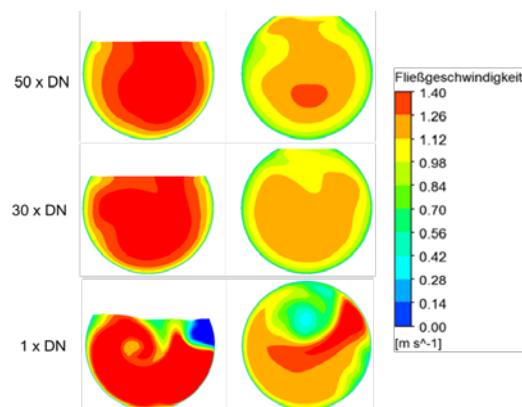


Abbildung 3: Entwicklung des Geschwindigkeitsprofils der Variante „Zusammenfluss im Schacht“ $DN_2/DN_1 = 0,5$, $Q_3 = 0,9 \cdot Q_v$ (links: ohne Rückstau; rechts: mit Rückstau)

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung des Geschwindigkeitsprofils derselben geometrischen Variante für die hydraulische Belastung von $Q_3 = 0,9 \cdot Q_v$ (entspricht 299,1 l/s) bei Normalabfluss und Rückstau.

Die Wasserspiegellagen beider untersuchten Strömungszustände zeigen, dass sich der Rückstau bis zur Störquelle auswirkt. Durch die Einleitung aus dem seitlichen Kanal (DN_2) wird eine im Uhrzeigersinn drehende Spiralströmung induziert. Diese ist bei Rückstau stabiler als bei Normalabfluss. Bei Normalabfluss lässt sich die spiralförmige Strömung bis 20xDN feststellen, während diese sich unter Rückstau bis ca. 30xDN fortpflanzt. Durch die Spiralströmung wird das Geschwindigkeitsprofil sehr stark deformiert, so dass teilweise zwei gegenüberliegende Geschwindigkeitsmaxima vorliegen. Ab 30xDN beginnen sich erste Symmetrieeigenschaften zu zeigen, jedoch liegt auch im Abstand 50xDN kein voll ausgebildetes Geschwindigkeitsprofil vor. Es handelt sich bei den ab 30xDN vorliegenden Profilen jedoch um Profile, auf die ein Messgerät kalibriert werden kann. Abbildung 4 zeigt die Indikatorverläufe für die Variante $DN_2/DN_1 = 0,5$ für alle untersuchten hydraulischen Belastungen.

Durch die Einleitung aus dem seitlichen Kanal (DN_2) wird eine im Uhrzeigersinn drehende Spiralströmung induziert. Diese ist bei Rückstau stabiler, als bei Normalabfluss. Die Indikatorverläufe der geometrischen Variante $DN_2/DN_1 = 0,5$ zeigen den Einfluss der induzierten Spiralströmung deutlich. Insbesondere im in Fließrichtung gesehen vorderen Bereich, weisen die Indikatoren einen sehr inhomogenen Verlauf auf. Durch die induzierte Spiralströmung liegt dort in Abständen unter 27xDN zum Einlauf ein fragmentiertes Geschwindigkeitsprofil vor. Wenn sich zum Beispiel an einem Messquerschnitt eines der beiden Geschwindigkeitsmaxima in der Messlotrechten befindet, wird der Durchfluss aufgrund der zu hohen mittleren Geschwindigkeit überschätzt und umgekehrt. Aus den Geschwindigkeitsprofilen kann daher aufgrund der spiralförmigen Strömung kein gleichmäßiger Verlauf resultieren. Ab einem Abstand von 35xDN von der Störstelle kann ein axialsymmetrisches Geschwindigkeitsprofil angenommen werden, das aufgrund der, ab dem Abstand vorliegenden, kleinen Indikatoren, für Messungen geeignet ist.

Die stark schwankenden orangen bzw. braunen Indikatorverläufe weisen darauf hin, dass sich insbesondere durch Rückstau beeinflusste Abflüsse auf eine Durchflussmessung auswirken. Je größer der Durchfluss wird, desto stärker ist die Beeinflussung des Rückstaus auf die Durchflussmessung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der benetzte Umfang bei gleichem Durchfluss proportional zum durchflossenen Querschnitt abnimmt. Da durch die Reibung an der Kanalwand Energie dissipiert wird, baut sich die durch die Störung induzierte Spiralströmung unter Normalabfluss schneller ab.

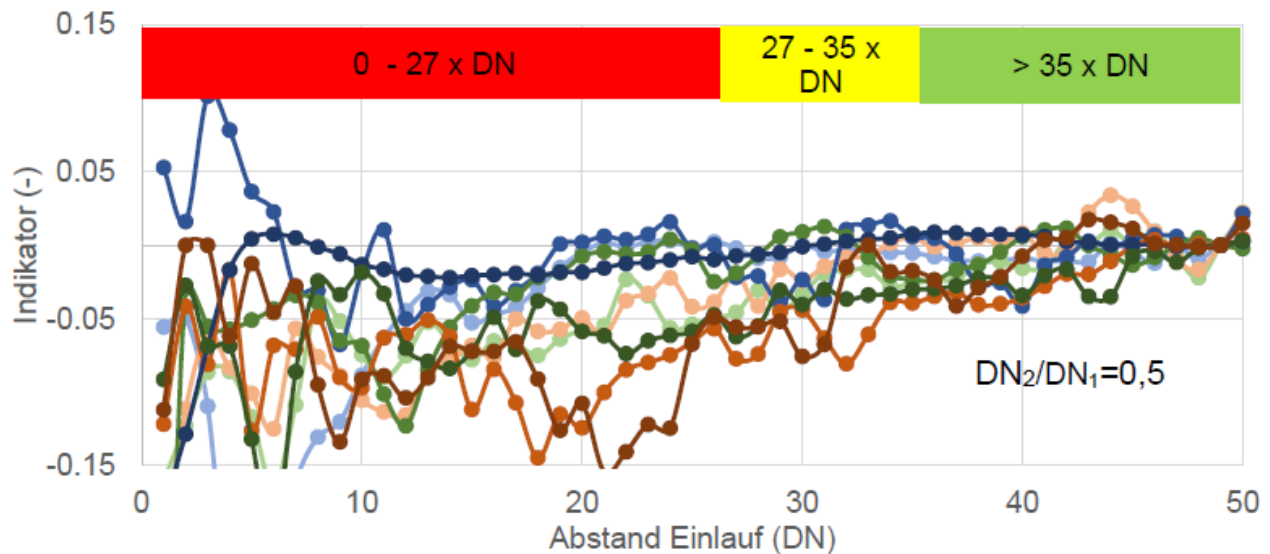


Abbildung 4: Indikator für Variante „Zusammenfluss im Schacht“ $DN_2/DN_1 = 0,5$, mit Zoneneinteilung

ohne Rückstau: blau und grün; mit Rückstau: orange und braun

hoher Durchfluss: hohe Farbintensität; geringer Durchfluss: schwache Farbintensität

4 ZUSAMMENFASSUNG

Im Forschungsvorhaben FLUKZ wurde der Einfluss von Störungen infolge seitlicher Zuflüsse auf die Axialsymmetrie der Geschwindigkeitsverteilung in teilgefüllten Kreisrohren untersucht. Exemplarisch werden Ergebnisse einer Variante dargestellt. Sie untersuchte den Einfluss des scheinbaren Zusammenflusses zweier Kreisrohre mit dem Durchmesser Verhältnis $DN_2/DN_1=0,5$.

Durch den scheinbaren Zusammenfluss, wird der Strömung eine Spiralströmung aufgeprägt, die sich in durch Rückstau beeinflussten Abflüssen weiter fortpflanzt, als unter Normalabfluss.

Ab einem Abstand $> 35x DN$ vom Zusammenfluss liegen nur noch geringfügige Asymmetrien des Geschwindigkeitsprofils vor. Für diese Fälle lassen sich Korrekturterme entwickeln für die Durchflussermittlung mit Messeinrichtungen, die vertikale Geschwindigkeitsprofile erfassen, kalibriert werden können.

5 DANK

Das zugrundeliegende Forschungsvorhaben „Durchflussmessung im Bereich gestörter Profile im Kanalnetz“, wurde im Rahmen des Programms „Transfer NRW: FH-EXTRA“ durch das Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes NRW gefördert.

6 REFERENZEN

- DIN EN ISO 748 (2005): *Hydrometrie-Durchflussmessung in offenen Gerinnen mittels Fließgeschwindigkeitsmessgeräten oder Schwimmern*. DIN EN ISO 748. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 52 S.
- DWA-M 181 (2011): *Messung von Wasserstand und Durchfluss in Entwässerungssystemen*. DWA-M 181. Hennef: DWA.
- Kölling, C. und Valentin, F. (1995): *SIMK - Durchflussmessungen*. In: *Wasserwirtschaft*, 85/1995, S. 494 - 499.
- Uhl, M.; Henrichs, M.; Voßwinkel, N.; Schnieders, A.; Mohn, R.: Genauigkeit der Durchflussmessung in kleinen Kreisprofilen. *Korrespondenz Abwasser Abfall*, 57 (2010) Nr. 6, S. 539-550.