

## Installationseffekte bei Wasserzählern

Franz Adunka, BEV und TU Wien\*)

### Abstract

The following paper informs about influences of flow disturbances on flow sensors for water meters. Influences like half opened ball valves, straightener and orifice plate are investigated with respect to the velocity profile in a window chamber mounted at the site of the meter. Characteristic parameters of the profiles are discussed.

### 1 Einleitung

Wie bereits an anderer Stelle dargestellt [1], haben Einbaufehler von Durchflusssensoren von Wärmezähler, und ganz allgemein auch bei allen anderen Durchflusszählern, eine große Bedeutung. In [1] wurden auch erste Messungen zu diesem Thema gezeigt und die Randbedingungen definiert, unter denen die Messungen ausgeführt wurden. Sie seien hier nochmals kurz zusammengefasst:

Wegen der teilweisen bekannten Abhängigkeit der Durchflusssensoren von Rohrleitungsstörungen kann vermutet werden, dass diese Abhängigkeit auf die Veränderungen des Strömungsprofils der Zulaufströmung durch diese Störungen zurückgeführt werden kann. Es gilt daher zunächst, diese Profiländerungen zu bestimmen, um anschließend die Wirkung auf Durchflusssensoren nach bestimmten Messprinzipien zu untersuchen. Dazu wurde ein ein-dimensionales LDA-System verwendet. Der erste Teil, nämlich die Veränderung des unge-störten Geschwindigkeitsprofils in der Rohrleitung wurde im letzten Berichtsjahr sehr ausführlich untersucht und soll auch hier kurz zusammengefasst werden: Die entsprechenden LDV-Messungen wurden auf dem Warmwasserprüfstand des BEV durchgeführt (siehe z.B. [2]). Die Wassertemperatur bei Messungen war 35 °C, die Durchflussstärken 200 L/h, 2.500 L/h, 4000 L/h, 12.000 L/h und 20.000 L/h. Bedingt durch die Abmessungen des Prüfstandes steht eine maximale Länge von 4,5 m zur Verfügung, die sich auf Ein- und Auslaufstrecken, Zähler, hydraulische Störungen und eventuelle Übergangsstrecken zwischen unterschiedlichen Rohrdurchmessern aufteilt. Die erweiterte Messunsicherheit der festgestellten Anzeigeänderungen war durch die Wahl von Referenzbedingungen äußerst gering und kann nach oben als mit  $U = 0,1 \%$  beschränkt angesehen werden. Die Messungen wurden an drei Fensterkammer der Größe DN 100, DN 50 und DN 40 durchgeführt, wobei an dieser Stelle nur von den Messergebnissen mit der Fensterkammer DN 40 berichtet werden soll. Aus praktischen Gründen wurden für die im Folgenden beschriebenen Messungen ein Durchfluss von 20.000 L/h gewählt, der einer mittleren Geschwindigkeit in der Fensterkammer von ca. 3,05 m/s entspricht.<sup>1</sup>

Es war noch die Frage zu klären, was man eigentlich als ungestörtes Profil bezeichnet: Genau genommen müsste die Prüfstrecke, d.h. die ungestörten Ein- und Auslaufstrecke jeweils unendlich lange sein. Wegen der endlichen Länge des Prüfstandes, auf dem die gegenständlichen Messungen ausgeführt wurden, ist man von diesem Idealfall weit entfernt. Per definitionem wurde daher eine ungestörte Einlaufstrecke bis zur Fensterkammer von  $L_E = 46,4 D$  (entsprechend 2 m Länge bei DN 40) in Verbindung mit einer Auslaufstrecke von  $23,2 D$  (entsprechend 1 m bei DN 40) als ungestört definiert. Nach den Messungen des Autors scheint dies annähernd auch der Realität zu entsprechen. Die Auslaufstrecke war bei fast

---

\*) Univ.-Prof. Dr. **Franz Adunka**, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), TU Wien

<sup>1</sup> Was ist die mittlere Geschwindigkeit? In unserem Fall ergibt sich die mittlere Geschwindigkeit aus dem Durchfluss, der gemessen wird und dem Querschnitt der Fensterkammer (siehe dazu auch Punkt 3)!

allen Messungen 23,2 D lang; lediglich bei der Messung mit einer Einlaufstrecke von 58 D Länge musste die Auslaufstrecke auf 17,4 D verkürzt werden.

Nach und vor der Ein- und Auslaufstrecke war eine entsprechende Erweiterung auf 50 mm vorgesehen, die dann letztlich in einen Rohrrinnendurchmesser von 150 mm eingeleitet wird. Vor der gesamten Prüfstrecke erfolgt eine Umlenkung des Wasserstromes um 180°.

Eine kurze Anmerkung noch zur Definition der Einlaufstrecke  $L_E$ : In Abb. 1 ist die Anordnung von Störungen und der Fensterkammer gezeigt. Die Strahlebene ist vom Anschlussflansch der Fensterkammer 150 mm entfernt, was bei DN 40 ca. 3,5 D (D ... Innendurchmesser der Rohrleitung) entspricht. Da aber dieser Abstand nicht verändert werden kann, wurde festgelegt, dass die Länge der ungestörten Einlaufstrecke zwischen Fensterkammer und Störung jeweils dem Abstand der Flansche entspricht. Wird eine Störung direkt an den Flansch der Fensterkammer angeschlossen, wird die Einlaufstrecke  $L_E = 0$  D gesetzt.

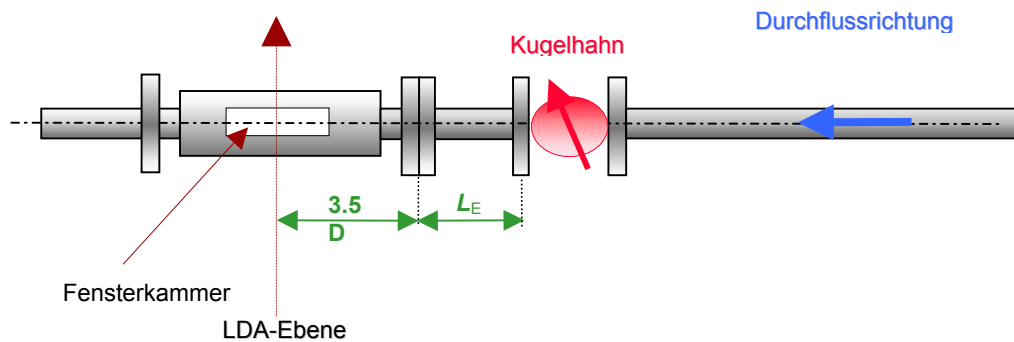


Abb. 1: Zur Definition der ungestörten Einlaufstrecke  $L_E$

## 2 Messergebnisse

### 2.1 Messungen mit halb geöffnetem Kugelhahn

In Abb. 2 ist die relative Änderung des Profiles gegenüber dem ungestörten Zustand unmittelbar nach einem Kugelhahn (0 D), nach 2,3 D, 5,8 D, 11,6 D, 23,2 D und 46,4 D gezeigt. Es ist gut zu erkennen, dass eine Einlaufstrecke von 23,2 D keineswegs ein ausgebildetes Profil ergibt. Erst nach ca.  $L_E = 58$  D kann das Profil als ausgebildet angesehen werden.

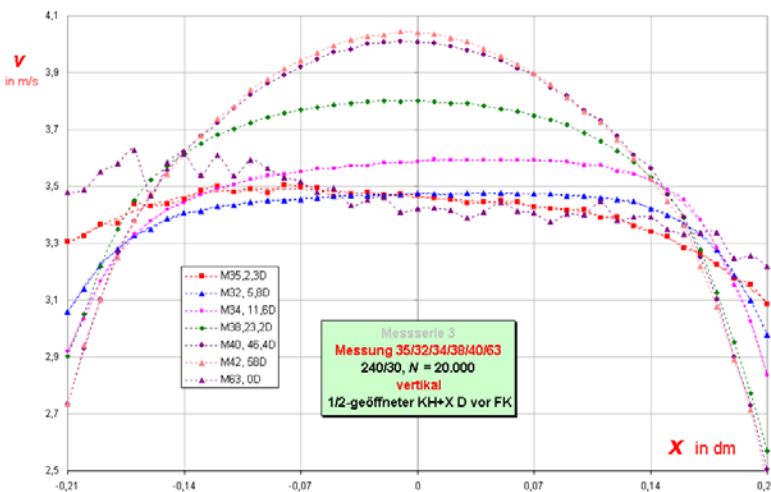
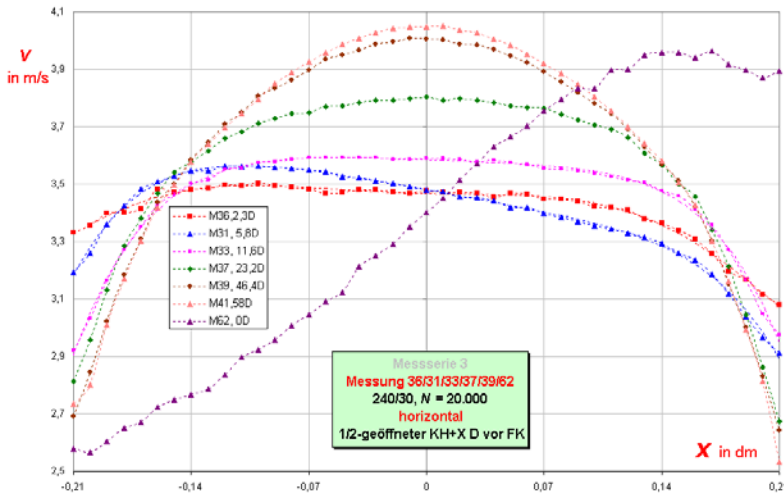
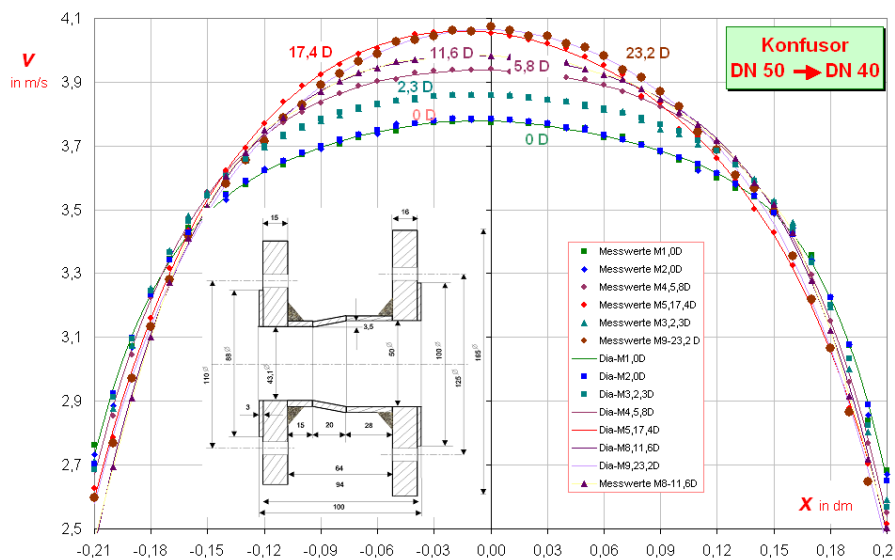


Abb. 2: Veränderung des Profils nach einem halb geöffneten Kugelhahn (DN 40) in Abhängigkeit von der ungestörten Einlaufstrecke  $L_E = x \cdot D$ . Der Reihe nach  $L_E = 0$  D, 2,3 D, 5,8 D, 11,6 D, 23,2 D, 46,4 D und 58 D, jeweils in horizontaler (unten) und senkrechter Durchstrahlung (links)



## 2.2 Störung: Konfuser DN 50 → DN 40

Auch der in der Praxis häufig zum Einsatz kommende Diffusor, im konkreten Fall einer Rohrleitung mit DN 50 (= 50 mm<sup>Ø</sup>) auf DN 40 (= 43,1 mm<sup>Ø</sup>) ergibt eine starke Veränderung des Profiles, abhängig vom Abstand des Diffusors zur Fensterkammer (≡ Ort der Zählermontage). In Abb. 3 ist die Veränderung des Geschwindigkeitsprofils mit  $L_E$  dargestellt. Bei  $L_E = 0$  D ist die maximale Geschwindigkeit in Rohrleitungsmittte um ca. 8 % niedriger als bei der ausgebildeten, d.h. ungestörten Strömung.

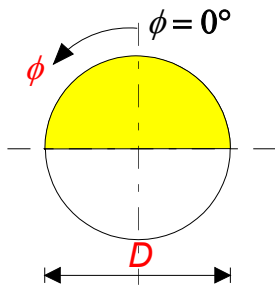


**Abb. 3:** Veränderung des Geschwindigkeitsprofils durch einen Konfuser (DN 50 → DN 40), horizontale Durchstrahlung

## 2.3 Störung: Blende

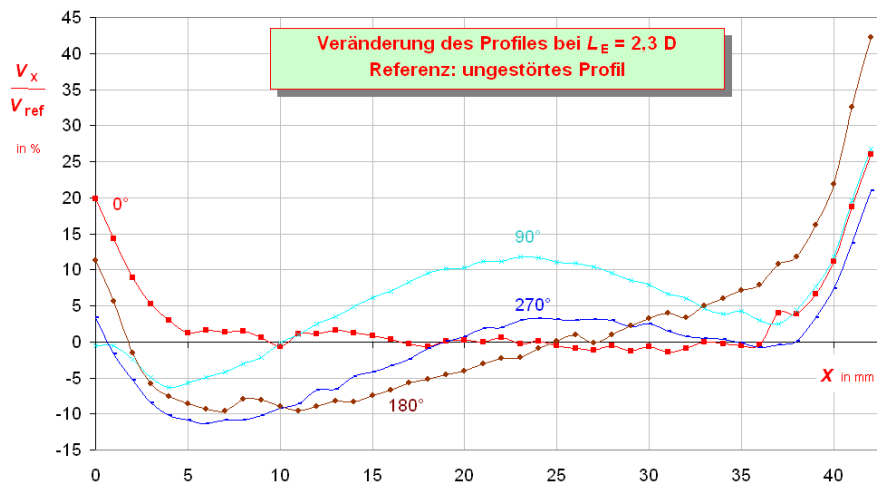
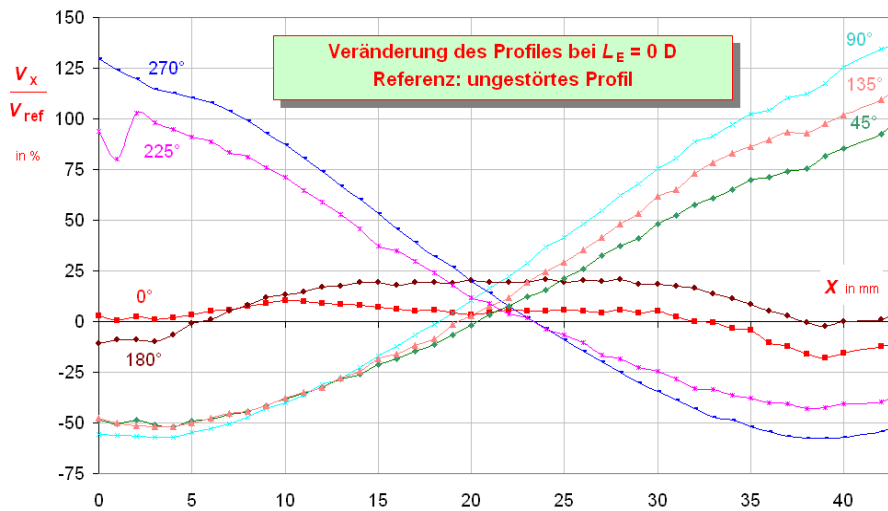
Nach Normvorschlägen [3] wurde eine Blende hergestellt, bei der der halbe Querschnitt abgedeckt ist (siehe Abb. 4). Anschließend wurden die Profile in Abhängigkeit von der ungestörten Einlaufstrecke (in Einheiten von „D“) und vom Verdrehungswinkel  $\phi$  bestimmt. In den folgenden Abbildungen wurde jeweils der Winkel um 90° (gegen den Uhrzeigersinn) verdreht

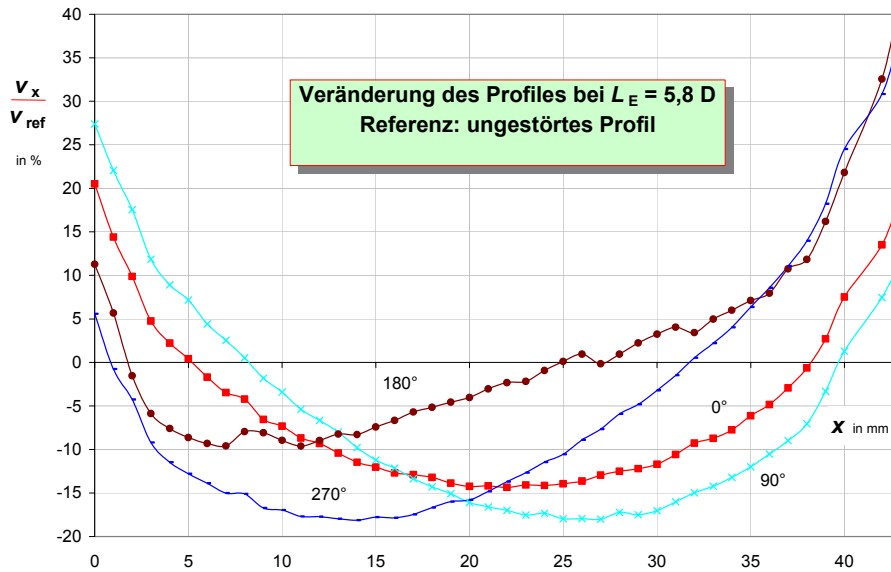
und die relativen Profilveränderungen, bezogen auf das ungestörte Profil, untersucht. Als Parameter sind die möglichen ungestörten Einlaufstrecken in Vielfachen von „D“ eingetragen (siehe Abb. 5).



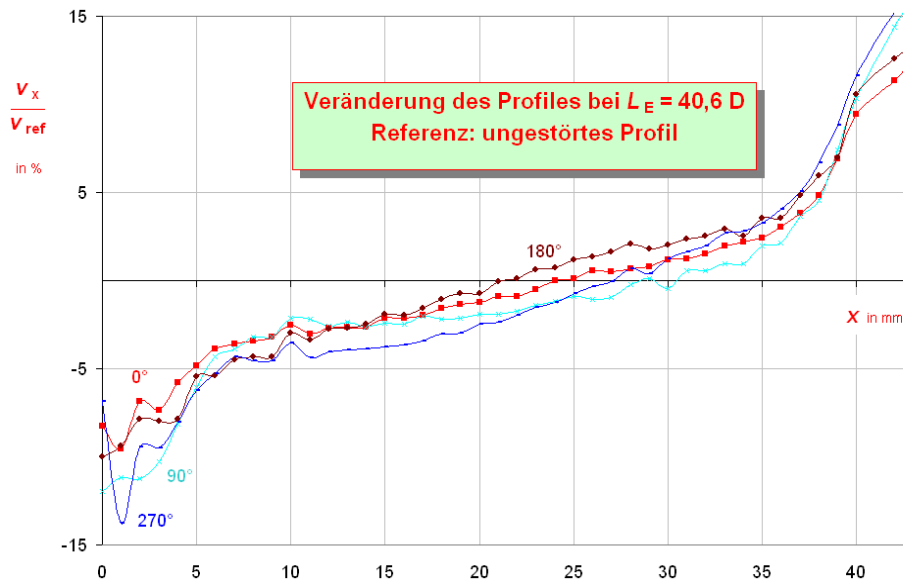
**Abb. 4:** Ansicht der Blende und Definition des Winkels  $\phi$   
links: geometrische Festlegungen

rechts: Ansicht der Blende





**Abb. 5:** Profilveränderung durch den Winkel  $\phi$ , definiert nach Abb. 11, Parameter: ungestörte Einlaufstrecke  $L_E = x \cdot D$ ; der Reihe nach  $L_E = 0 D, 2,3 D, 5,8 D, 40,6 D$ . Alle Werte sind auf das ungestörte Profil bezogen ( $L_E = 46,4 D$ )



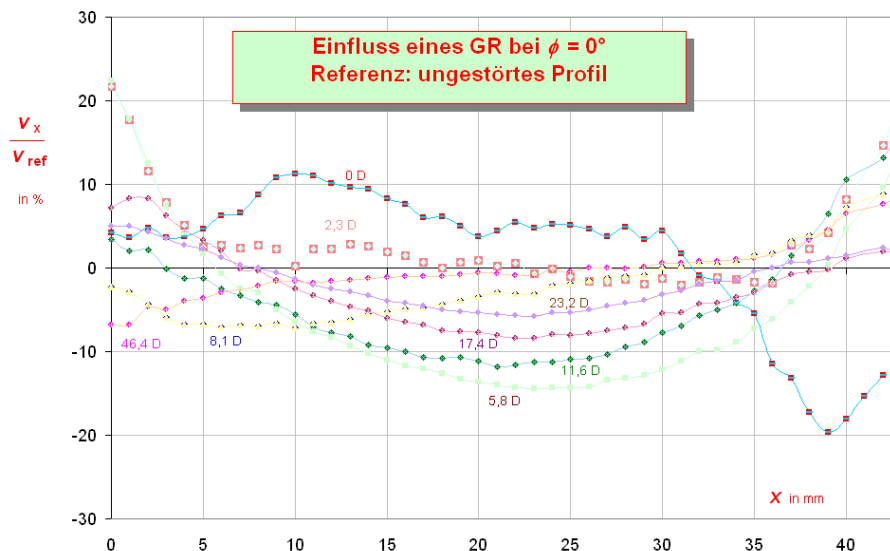
## 2.4 Störung: Gleichrichter

Gemeinhin wird der Gleichrichter als Hilfestellung dann eingesetzt, wenn die nötigen Einlaufstrecken vor einem Zähler nicht realisierbar sind. Das kommt in der Praxis sehr häufig vor, weshalb die Brauchbarkeit von Gleichrichtern im Zusammenhang mit der Verkürzung der nötigen Einlaufstrecken untersucht werden soll. In Abb. 6 ist der verwendete Gleichrichter vom Typ Mitsubishi gezeigt. Wird der Gleichrichter zunächst in einer ungestörten Leitung (Länge ca. 50 D) in unterschiedlichem Abstand zur Fensterkammer eingebaut, dann stellt der Gleichrichter selbst eine Störquelle dar, die das Profil in der Fensterkammer beeinflusst.



**Abb. 6:** Ansicht des verwendeten Mitsubishi-Gleichrichters

In Abb. 7 sind dazu die entsprechenden Profile dargestellt. Es ist interessant festzustellen, dass der Gleichrichter eine von der Einlaufstrecke  $L_E$  modulierte Veränderung des Profils bewirkt. Die Abweichung vom ungestörten Profil ist auch nach einer Einlaufstrecke von  $L_E = 46,4 D$  noch merkbar, dort allerdings in erster Linie im Randbereich.



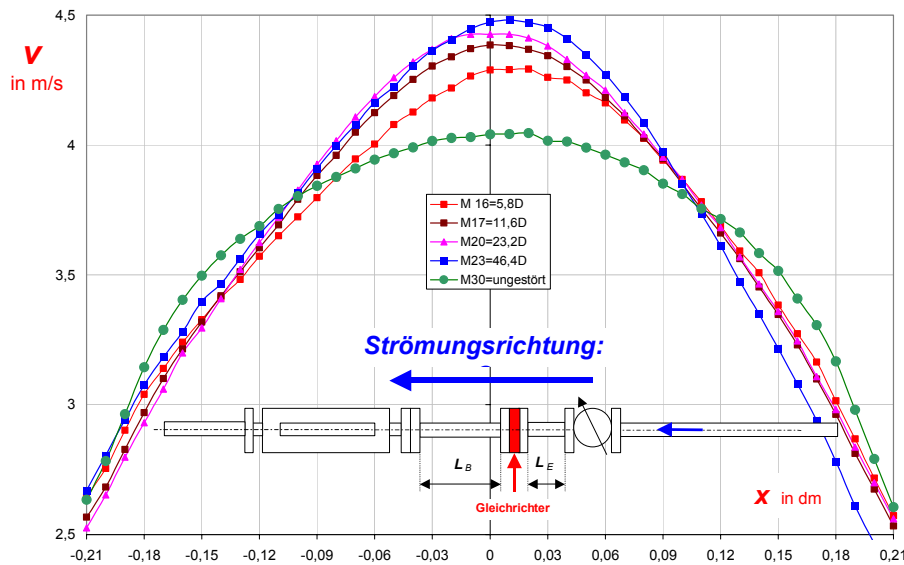
**Abb. 7:** Veränderung des Profils durch einen Mitsubishi-Gleichrichter: Relative Änderung des Geschwindigkeitsverlaufes durch einen Gleichrichter in Relation zur ungestörten Strömung

## 2.5 Gleichrichter und halb geöffneter Kugelhahn

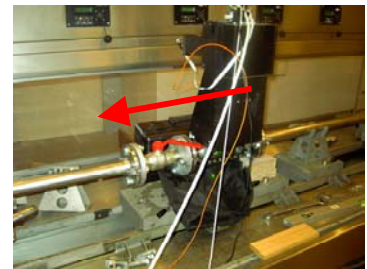
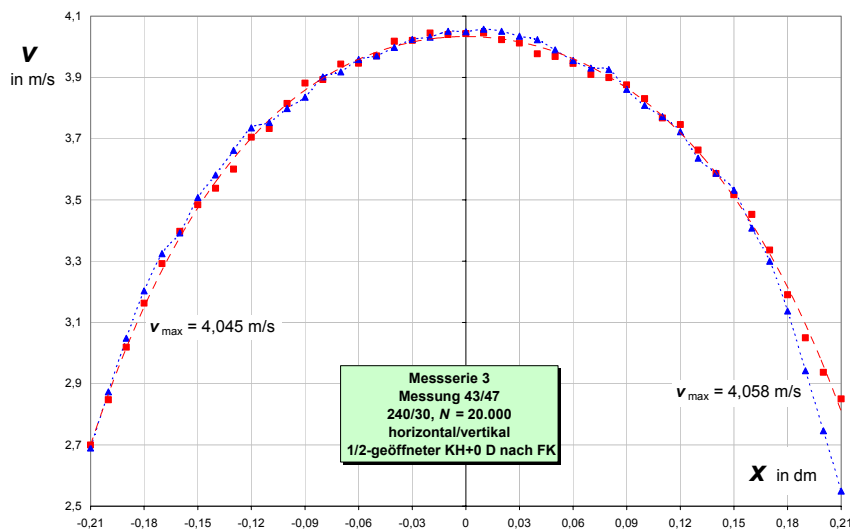
Aus der Gasmengenmessung ist bekannt, dass auch nach einem Gleichrichter eine mehr oder weniger lange Einlaufstrecke erforderlich ist [4]. Aus den vielen Möglichkeiten wurde daher folgender Fall ausgewählt: Halb geöffneter Kugelhahn, danach Einlaufstrecke  $L_E = 2,3 D$ , Gleichrichter mit Beruhigungsstrecke  $L_B = 5, 8 D \dots 46,4 D$ . In Abb. 8 sind die Messergebnisse für diese Fälle dargestellt. Es wurde außerdem die Geschwindigkeitsverteilung des ungestörten Falles (grüne Symbole, grüne Linie) angegeben. Man erkennt schön, dass mit zunehmender Beruhigungsstrecke  $L_B$  die Abweichung vom ungestörten Profil statt kleiner größer wird.

## 2.6 Störung in der Auslaufstrecke

In der Regel wird in der Durchfluss-Messtechnik davon ausgegangen, dass die Auslaufstrecke der halben Einlaufstrecke entsprechen soll. Um auch diesen Fall zu untersuchen, wurde der aus den vorhergehenden Messungen vertraute Kugelhahn nach der Messkammer angeordnet und zwar in einem Abstand von  $0 D$  und  $2,3 D$ . Die Ergebnisse sind in Abb. 9 dargestellt. Wie man unschwer erkennt, ist der Einfluss der Auslaufstrecke praktisch vernachlässigbar.



**Abb. 8:** Veränderung des Geschwindigkeitsprofils nach einem halb geöffneten Kugelhahn und einer Einlaufstrecke zum Gleichrichter von  $2,3 D$  in Abhängigkeit von der Beruhigungsstrecke  $L_B = x \cdot D$  zwischen Gleichrichter und Fensterkammer

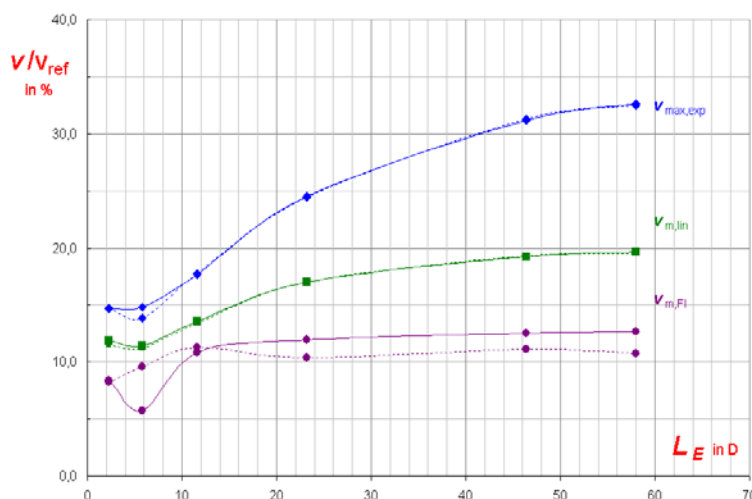


**Abb. 9:** Geschwindigkeitsprofil in der Auslaufstrecke nach  $0 D$  und  $0 D$  Abstand von der Fensterkammer daneben: Ansicht der Messanordnung: Die Strömungsrichtung ist von rechts nach links (Pfeil)

### 3 Bewertung der Ergebnisse

Die bisher präsentierten Ergebnisse sind als vorläufig anzusehen, daher auch deren Bewertung. Experimentell sind die Einflüsse von Störungen auf Fehlerkurven von Durchflussmessgeräten einigermaßen bekannt [1], [5]; die Verknüpfung mit den Geschwindigkeitsprofilen konnte bisher aber eigentlich nicht schlüssig nachgewiesen werden. Welche Aussagen können nun aus den bisher durchgeführten Messungen gezogen werden; m.a.W.: wie sind die gezeigten Profiländerungen zu bewerten?

Die Ausgangsbasis für alle folgenden Überlegungen ist die mittlere Geschwindigkeit, die sich aus dem Durchfluss und dem Querschnitt ergibt. Da die Durchflussschwankungen während der Messungen von der Größe von  $< 0,2\%$  waren, kann bei bekannter Querschnittsfläche die mittlere Geschwindigkeit in der Fensterkammer mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden. Aus den gemessenen Profilen wurde durch Ausgleichsrechnung ein Polynom sechsten Grades ermittelt, das genügend genau die Messwerte beschreibt. Daraus kann durch Integration die mittlere Geschwindigkeit der betrachteten Durchstrahlungsebene ermittelt werden, die nun mit der oben angegebenen mittleren Geschwindigkeit, die dem aktuellen Durchfluss entspricht, verglichen wird. Hier ergeben sich Unterschiede, auf die wir aber nicht eingehen werden. Um den räumlichen Verlauf der Profile zu ermitteln, wurden teilweise bis zu acht Profile über den Querschnitt gemessen ( $\phi = n \times 45^\circ$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots, 8$ , siehe dazu die Abb. 5). Bei bestimmten Störungen (Gleichrichter, Diffusor etc) und bei größeren Einlaufstrecken ist das Profil annähernd zylindersymmetrisch. Als Beispiel dazu sei auf die Abb. 2 und Abb. 5 verwiesen. Ist die Störung in unmittelbarer Nachbarschaft der Fensterkammer, treten deutliche Unterschiede in den lokalen Geschwindigkeiten bei verschiedenen Durchstrahlungsrichtungen auf. In Abb. 5 ist dies sehr schön zu erkennen. In einem Abstand von  $2,3 D$  von der Messkammer sind die Abweichungen zwischen den einzelnen Durchstrahlungswinkeln bis zu  $200\%$ , wogegen bei einer Einlaufstrecke von  $40,6 D$  die Unterschiede in der Größenordnung von  $< 5\%$  liegen.<sup>2</sup>



**Abb. 9:** Abhängigkeit der charakteristischen Geschwindigkeiten von der ungestörten Einlaufstrecke, bezogen auf die mittlere Geschwindigkeit im Rohrquerschnitt  $v_{ref,Fl}$ . Es bedeuten:

- $v_{max,exp}$  experimentell ermittelte maximale Geschwindigkeit
- $v_{m,lin}$  linear gemittelte Geschwindigkeit
- $v_{m,Fl}$  flächengemittelte Geschwindigkeit, zylindersymmetrisch

Betrachtet man in Abb. 5 den Fall der Einlaufstrecke von  $5,8 D$ , so erhält man für die mittlere Geschwindigkeit aus dem Durchfluss  $v_m = 3,054$  m/s, für die maximale Geschwindigkeit im horizontalen Profil:  $3,56$  m/s, und für das vertikale Profil:  $3,49$  m/s.<sup>3</sup> Bildet man aber im konkreten Fall die linear gemittelte Geschwindigkeit im Fall der horizontalen Durchstrahlung, so erhält man:  $v_{m,lin} = 3,403$  m/s, im Fall der vertikalen Durchstrahlung  $v_{m,lin} = 3,397$  m/s. Die beiden Werte unterscheiden sich um nur  $0,18\%$ , was vernachlässigbar ist.

Im Einzelnen definiert man die folgenden charakteristischen Geschwindigkeiten:

- Als **Referenzgeschwindigkeit** wurde die oben aus Durchfluss und Querschnitt ermittelte Geschwindigkeit verwendet:  $v_{ref,Fl} = 3,054$  m/s. Sie ist unabhängig von der Einlaufstrecke bzw. von Störungen (siehe dazu die Fußnote 3). Die Problematik der Ermittlung einer geeigneten Referenzgeschwindigkeit mag aus der Abb. 18

<sup>2</sup> Im Randbereich sind die Abweichungen auch bei einer Einlaufstrecke von  $40,6 D$  noch immer beträchtlich. Diese Abweichungen rühren aber von der Ausformung der Fensterkammer her, die im Bereich der Durchstrahlung eine Abplattung zeigt.

<sup>3</sup> Die mittlere Geschwindigkeit in der Fensterkammer ist durch die vier Ausnehmungen für das Einsetzen der Glasplatten deutlich geringer als im anschließenden Rohr (dort ist  $v = 3,808$  m/s).



- mittlung einer geeigneten Referenzgeschwindigkeit mag aus der Abb. 18 hervorgehen, die einen Schnitt durch die Fensterkammer DN 50 zeigt.
- Ein weiteres Charakteristikum ist die **maximale Geschwindigkeit**  $v_{\max, \exp}$ ; sie folgt aus den Messungen, ihre Größe ist ein Maß für die Annäherung an die ausgebildete Strömung.
  - $v_{m, \text{lin}}$  ist die **linear gemittelte Geschwindigkeit** eines Messpfades. Sie wird gewonnen, indem man ein Polynom 6. Grades durch die Messwerte legt und daraus einen Mittelwert bildet.
  - $v_{m, \text{Fl}}$  ist die **über die Fläche gemittelte Geschwindigkeit**, wenn man annimmt, dass die Geschwindigkeitsverteilung rotationssymmetrisch ist. Man erhält naturgemäß für jede Einlaufstrecke  $L_E$  zwei Werte, die einmal der horizontalen und einmal der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung entsprechen. Man erkennt unschwer aus Abb. 17, dass auch nach einer Einlaufstrecke von  $58 D$  **keine** durchgehende Symmetrie erreichbar ist.<sup>4</sup> Größere ungestörte Einlaufstrecken können von der verwendeten Durchfluss-Messeinrichtung nicht realisiert werden.

Es erhebt sich die Frage, welche Aussagen mit den definierten Geschwindigkeiten hinsichtlich der Kalibrierung von Durchflusszählern gemacht werden können?

Zunächst ist, wie bereits erwähnt, die maximale Geschwindigkeit  $v_{\max, \exp}$  ein Maß für die Annäherung an den ungestörten Zustand. Die Relation dieser Geschwindigkeit zur mittleren Referenzgeschwindigkeit ( $v_{\text{ref, Fl}}$ ) ist für den Durchfluss von 20.000 L/h: 1,129 und naturgemäß abhängig von der Reynoldsen Zahl, die in unserem Fall ca. 170.000 ist.

Die linear gemittelte Geschwindigkeit  $v_{m, \text{lin}}$  wird von allen Messgeräten erfasst, deren Signal durch eine Mittelung in einer Schnittebene gebildet wird, also typischerweise Ultraschallzähler.

Die flächengemittelte Geschwindigkeit  $v_{m, \text{Fl}}$  ist wieder eine Referenzgröße für beispielsweise MID's, also Magnetisch-induktive Durchflusszähler. Bei diesem Zählertyp ist noch die Wertigkeitsfunktion zu berücksichtigen, mit der das Messsignal bewertet wird (siehe z.B. [3]). Bei anderen Messprinzipien sind die Aussagen leider nicht so eindeutig zu treffen.

Man kann aber aus diesen wenigen Messungen schon folgern, dass zur Erreichung einer vollausgebildeten Strömung deutlich mehr als  $10 D$  nötig sind, wobei allerdings einschränkend zu sagen ist, dass die hier untersuchten Störungen von sehr starker Natur sind und nach Meinung vieler Fachkollegen in der Praxis nicht oder nur selten vorkommen. Das mag in vielen Fällen auch richtig sein; die Fälle: Erweiterung/Reduzierung von Rohrleitungsquerschnitten oder in die Strömung hineinragende Dichtungen etc. werden aber sehr häufig beobachtet.

Ein paar Bemerkungen noch zur **Messgenauigkeit**: Das Messvolumen der Messpunkte beträgt ca. 1 mm, der typische Messraster wurde ebenfalls mit 1 mm gewählt. Damit ist auch die Lokalisierung eines Messpunktes mit dieser Unsicherheit behaftet. Die Anzahl der Bursts, d.h. der Zahl der Messergebnisse pro Messpunkt ist variabel, deren Zahl wurde aber so gewählt, dass zumindest 2000 Ereignisse pro Messpunkt anfallen. In den meisten Fällen ist die Ereignisrate aber noch wesentlich größer (bis 50.000). Da in den Diagrammen immer Mittelwerte aus sehr vielen Ereignissen aufgetragen sind, geht man von einer durchschnittlichen Burstzahl von  $10^4$  aus, dann ist die Genauigkeit der Mittelwertbildung um den Faktor 100 größer als es dem Turbulenzgrad entspricht, der meist  $< 20 \%$  ist. Das bedeutet, dass die Standardunsicherheit des Mittelwertes einer ermittelten Geschwindigkeit ca. 0,2 % beträgt. Bei einer Geschwindigkeit von 4 m/s entspricht dies einer Unsicherheit von  $8 \cdot 10^{-3}$  m/s, ein Wert, der im Diagramm nicht mehr darstellbar ist. Unter Berücksichtigung anderer Einflussgrößen kann man daher die Unsicherheit der Angaben mit etwa  $\pm 0,1$  m/s schätzen.

---

<sup>4</sup> Dort müssten die beiden Kurven zusammenfallen!

## 4 Weitere Vorhaben

Die bisherigen Messungen sind nur ein Teil eines Projektes, mit dem das Problem der benötigten Ein- und Auslaufstrecken bei Durchflusszählern untersucht wird.

Geplant sind künftig noch die folgenden Messungen:

- Systematische Bestimmung der beschriebenen Einflüsse auf ausgewählte Zählertypen wie Flügelradzähler, Ultraschallzähler und magnetisch-induktive Zähler;
- Verwendung der Fensterkammer DN 50 zur Aufnahme analoger Profile bei Rohrlitungsdurchmessern von DN 50 und Untersuchung von Woltmanzählern der Bauarten WP und WS dieser Nenngröße;
- Bau einer Fensterkammer DN 25, um die Untersuchung von Einstrahlzählern für den Wohnungsbereich zu ermöglichen, die in sehr großen Stückzahlen zur Wärmeenergie- und auch Wassermessung verwendet werden und bekanntermaßen empfindlich sind gegenüber Störungen des Geschwindigkeitsprofils,
- Bau von standardisierten Rohr- und Raumkrümmern und Untersuchung der Profiländerungen nach diesen „Störungen“. Hier interessiert vor allem ein sich ausbildender Drall, der sich der Rohrströmung überlagert und Auswirkungen auf Zähler zeigen könnte.
- Untersuchung der Wirkung unterschiedlicher Bauarten von Gleichrichtern im Sinne der Erreichung möglichst kurzer Einlaufstrecken, wie es die messtechnische Praxis erfordert.

Darüber wird zu einem späteren Zeitpunkt berichtet werden.

## Danksagung

Besonders möchte ich mich bei meinem Mitarbeiter, Herrn *Georg Fuchsberger* bedanken, der mir bei der Planung, Vorbereitung und Durchführung der zahlreichen Experimente, die hier auszugsweise vorgestellt wurden, sehr behilflich war.

## Literatur

- [1] *Adunka, F.: Beeinflussung von Durchflusssensoren von Wärmezählern durch gestörte Geschwindigkeitsverteilungen in Rohrleitungen*, Tagungsband der 11. Fachtagung: Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 9. –11. September 2003, Braunschweig (PTB)
- [2] *Adunka, F.: Beeinflussung der Messrichtigkeit von Durchflusssensoren durch gestörte Geschwindigkeitsverteilungen*, 154. PTB-Seminar: Messung thermischer Energie für den industriellen Bereich, Berlin 14. November 2000
- [3] EN 1434:2003, Teil 1
- [4] *Mickan B.: Systematische Analyse von Installationseffekten sowie der Effizienz von Strömungsgleichrichtern in der Großgasmengenmessung*, Shaker-Verlag, Aachen, 1999
- [5] *Adunka, F.: Handbuch der Wärmeverbrauchsmessung*, 3. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen, 1999
- [6] *Adunka, F.: Messunsicherheitsbestimmung am Warmwasser-Durchflussprüfstand des BEV*, PTB-Seminar: Neue Entwicklungen bei der Kalibrierung von Durchflussmessgeräten, PTB-Braunschweig, 13. und 14. November 2001