

1 Problemstellung und experimentelle Vorarbeiten

Nach der Europeanorm EN 1434:2003 ist es für die Praxis der exakten Wärmeenergiemessung gewünscht, Durchflusssensoren mit Messabweichungen zu verwenden, die maximal $\pm 1,0\%$ betragen [1]. Diese hohen Anforderungen setzen aber auch voraus, dass die Zähler auf Prüfständen kalibriert werden, die extrem geringe Messunsicherheiten garantieren sowie ideale strömungstechnische Voraussetzungen (unendlich lange Einlaufstrecken) realisieren.

In der Praxis der Kalibriertechnik wie auch im Einsatz der Zähler in Messanlagen sind die hydraulisch optimalen Einbaubedingungen kaum zu erfüllen. Die daraus folgenden Forderungen an Prüfstände und Einbausituationen wurden an anderer Stelle dargelegt [2,3]; an dieser Stelle sollen die Ursachen für Messabweichungen untersucht werden, für die Veränderungen im Strömungsprofil an der Stelle des Zählereinbaues vermutet werden. Bisher wurden die folgenden Auswirkungen von hydraulischen Störungen beobachtet:

- (1) Verschiebungen der Fehlerkurve des betrachteten Zählers in Abhängigkeit vom Durchfluss und
- (2) quasiperiodische Veränderungen der Fehlerkurve durch Veränderungen der Beruhigungsstrecke zwischen Störer und Zähler

Außerdem zeigten sich starke Abhängigkeiten vom Messprinzip: So zeigen i.A. Sensoren nach dem Turbinenzählerprinzip größere Abhängigkeiten von hydraulischen Störungen als nach den meisten anderen Messprinzipien (z.B. Ultraschall, magnetisch-induktiv).

Ein Beispiel soll dies demonstrieren: Bringt man vor einem Woltmanzähler mit einem Flügelrad, dessen Achse parallel zur Rohrachse liegt (Grundbauart: WP), einen teilgeöffneten Kugelhahn an, dann beobachtet man in Abhängigkeit von der ungestörten Beruhigungsstrecke in Einheiten vom Rohrdurchmesser D die in Abb. 1 gezeigte Verschiebung der ungestörten Fehlerkurve.

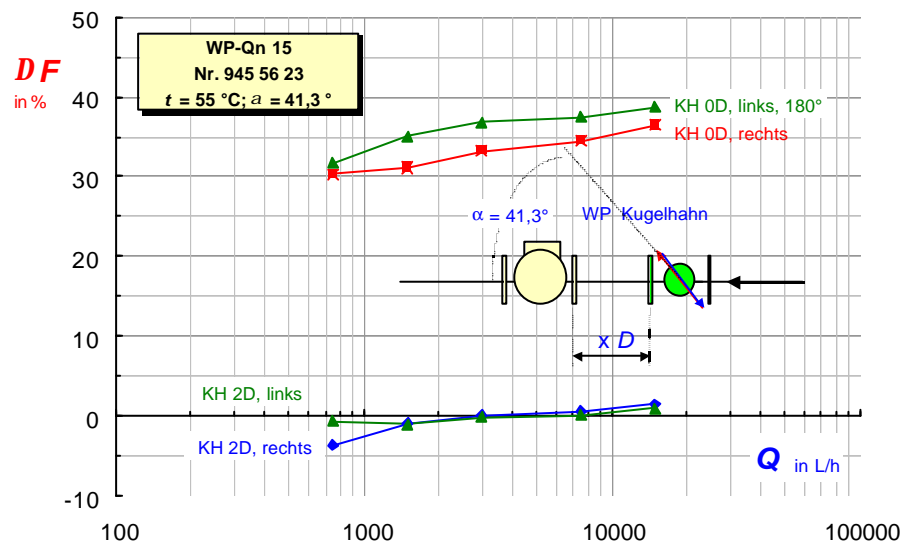


Abb. 1: Verschiebung der Fehlerkurve eines Durchflusssensors der Bauart WP gegenüber dem ungestörten Fall, durch einen teilgeöffneten Kugelhahn in Abhängigkeit vom Durchfluss. Parameter: Länge der ungestörten Beruhigungsstrecke zwischen Störer und Durchflusssensor ($x \cdot D$). Die Durchflussrichtung ist von rechts nach links, Wassertemperatur: 55 °C

Verändert man den Öffnungswinkel des Kugelhahnes α erhält man die Ergebnisse nach Abb. 2. Aus diesen erkennt man den sehr starken Einfluss der Veränderung des Geschwindigkeitsprofils unmittelbar vor dem Durchflusssensor, wogegen aus Abb. 1 auf den starken Einfluss der Beruhigungsstrecke geschlossen werden kann. Man kann an diesem Beispiel auch ablesen, dass eine Abhängigkeit

- vom Durchfluss Q nach (1) gegeben ist sowie
- von der Länge der Beruhigungsstrecke, gemessen in Einheiten der Nennweite D des Anschlussrohres.

Ein weiteres Beispiel zu (2) zeigt die Abb. 3.

Um nun die Auswirkungen der diversen Störungen mit den Veränderungen des Strömungsprofils an der Stelle des Einbaues eines Durchflusssensors zu korrelieren, wurde ein LDV-System ange-

* Univ.-Prof. Dr. Franz Adunka, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien

schaft sowie Fensterkammern der Nennweiten DN 40 und DN 100, die von der PTB/Berlin zur Verfügung gestellt wurden (Abb. 4 und 5).

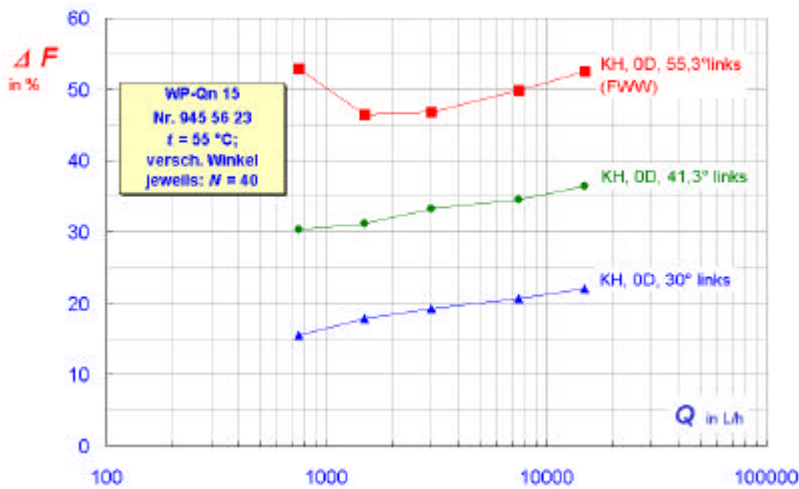
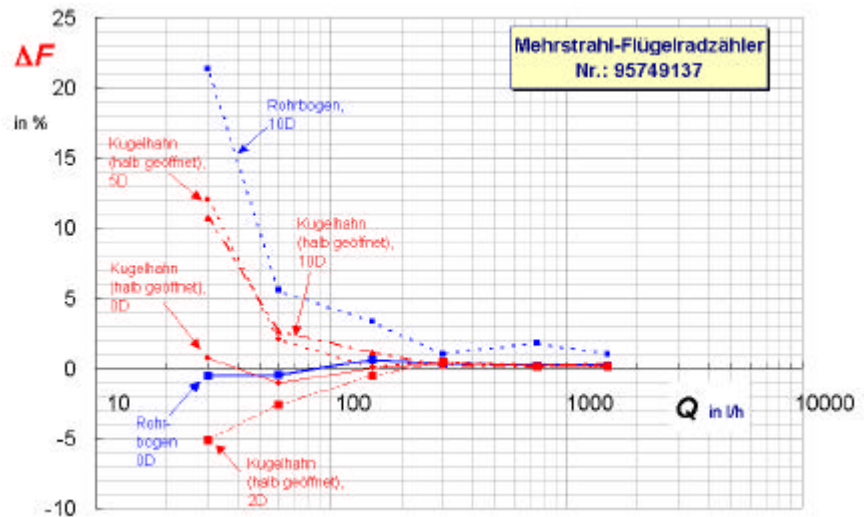


Abb. 2: Wie Abb. 1, nur Veränderung des Öffnungswinkels am Kugelhahn

Abb. 3: Veränderung der Fehlerkurve eines Mehrstrahl-Flügelradzählers durch verschiedene hydraulische Störer: Kugelhahn, halb geöffnet, Rohrbogen ($2 \times 90^\circ$), Wassertemperatur: 55 °C



2 Messergebnisse

Die LDV-Messungen wurden auf dem Warmwasserprüfstand des BEV durchgeführt (siehe z.B. [4]). Die Wassertemperatur bei den im Folgenden präsentierten Messungen war 35 °C, die Durchflussstärken 200 L/h, 2.500 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 geeignete Wahl von Referenzbedingungen (siehe dazu [4]) äußerst gering und kann nach oben mit $U = 0,05 \%$ beschränkt werden.

Da im Augenblick nur zwei Fensterkammern mit DN 40 und DN 100 zur Verfügung stehen, mussten die geplanten Messungen auf diese beschränkt werden. Es wurden dazu Zähler nach verschiedenen Messprinzipien ausgewählt, definierte hydraulische Störungen vorgegeben und die Profiländerungen durch diese Störungen mit den Verschiebungen der Fehlerkurven korreliert.

Vorerst wurden die ausgewählten Prüflinge ausgiebig getestet in Hinblick auf:

- (1) Stabilität der Fehlerkurven der Zähler durch Wiederholmessungen über einen längeren Zeitraum
- (2) Fehlerkurve im ungestörten (oder nahezu ungestörten) Fall, gekennzeichnet durch unendliche (oder sehr lange) Einlaufstrecken mit dem inneren Durchmesser des Zählerstutzens
- (3) Aufbringen der Störungen und Feststellung der Verschiebungen der ungestörten Fehlerkurve

Ein Beispiel zu (1) zeigt die Abb. 6 zu (2) die Abb. 7 und (3) die Abb. 8.

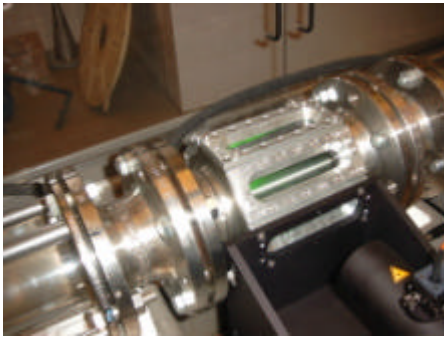


Abb. 4: Fensterkammern der Größe DN 100

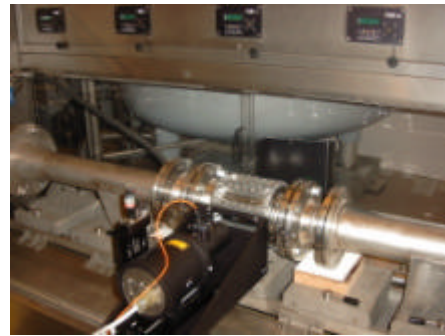


Abb. 5: Ansicht des LDV-Systems in der Rohrleitung

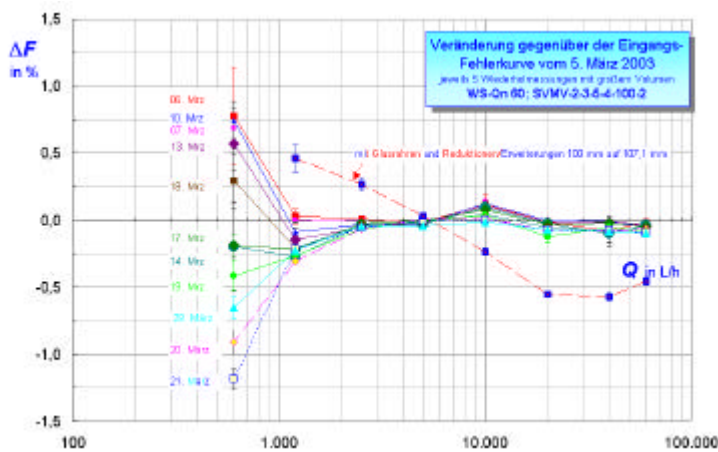


Abb. 6: Stabilität der Fehlerkurve eines Woltmanzählers der Bauart WS (DN 100), gemessen über einen Zeitraum von knapp einem Monat

In diesem Beitrag werden lediglich die Profilmessungen für Rohr-Nennweiten DN 40 gezeigt, da im Augenblick die Messergebnisse an der Nennweite DN 100 durch fehlende Rohre mit den richtigen Durchmessern scheitern.¹ In Tabelle 1 sind die Messungen dargestellt,

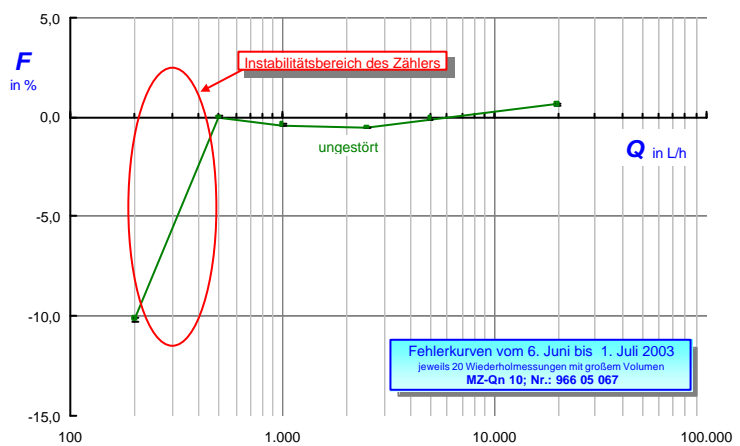
Abb. 7: Fehlerkurve eines Mehrstrahl-Flügelradzählers der Nenngröße Qn 10, DN 40, mit sehr langen Ein- und Auslaufstrecken

In diesem Beitrag werden lediglich die Profilmessungen für Rohr-Nennweiten DN 40 gezeigt, da im Augenblick die Messungen an der Nennweite DN 100 durch fehlende Rohre mit den richtigen Durchmessern scheitern. In Tabelle 1 sind die Messungen dargestellt, die bisher vorgenommen wurden.

Danach wurden sämtliche Profile gemessen, für die Ergebnisse über Messabweichungen des untersuchten Zählers vorliegen: Einlaufstrecke 2 m, 1 m, 0 m, gerechnet vom Anschlussflansch des Zählers, Kugelhahn offen, bzw. unter 45° geöffnet mit den o.a. Einlaufstrecken.

In Abb. 9 ist das ungestörte Profil an der Stelle des Zählers gezeigt, wobei als ungestört folgender Zustand bezeichnet wird:

- **Zähler-Flansch** DN 40 mit Innendurchmesser: 43 mm



¹ Die Probleme entstanden dadurch, dass es zu jeder Nennweite unterschiedliche Rohrdurchmesser gibt, die abhängig von der Druckstufe sind. Die Zählerhersteller haben darauf dahingehend reagiert, dass sie die Ein- und Auslaufstutzen relativ beliebig geformt haben. So haben Zähler mit ansonsten gleichen Dimensionen, zB. DN 100, einmal einen tatsächlichen Innendurchmesser des Anschlussstutzens von 100 mm, das andere Mal einen Innendurchmesser von 107,1 mm!

- **Anschlussrohr** vor dem Zähler DN mit Innendurchmesser 43 mm und einer Länge von 2 m (\approx 46 D), Anschlussrohr nach dem Zähler 43 mm und einer Länge von 1 m (\approx 23 D). Material der Rohre: V4A

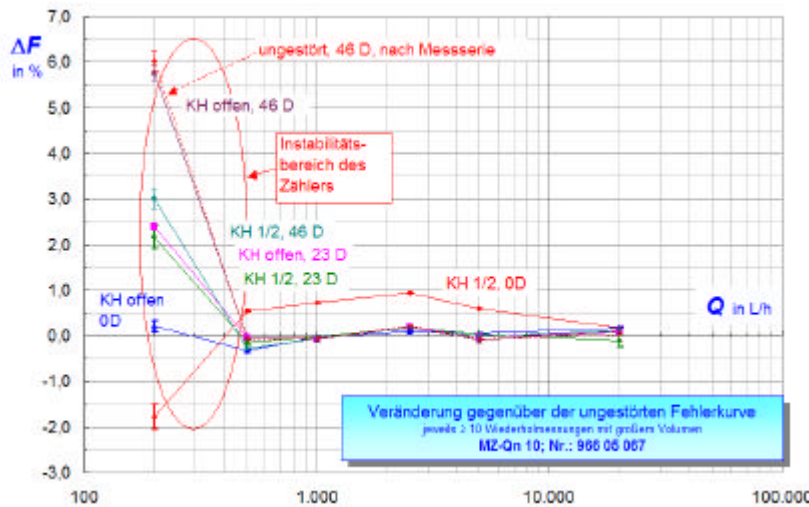


Abb. 8: Veränderung der Fehlerkurve eines Mehrstrahl-Flügelradzählers der Nennweite 40 mm bezüglich des ungestörten Falles durch einen halb geöffneten Kugelhahn unmittelbar vor dem Zähler und in einem Abstand von 1 m bzw. 2 m (23 D bzw. 46 D), mehr als 10 Wiederholmessungen

Es wurden demnach sämtliche Profile gemessen, für die Messergebnisse des untersuchten Zählers vorliegen: Einlaufstrecke 2 m, 1 m, 0 m, gerechnet vom Anschlussflansch des Zählers, Kugelhahn offen, bzw. unter 45° geöffnet mit den o.a. Einlaufstrecken.

Tabelle 1: Messergebnisse an DN 40, Qn 10; Durchstrahlung in horizontaler und vertikaler Richtung² „N“ ist die Anzahl der Bursts pro Messung

Messung Nr	Durchfluss [L/h]	mit GR	ohne GR	ohne KH	KH offen	KH 1/2-offen	ungestörte ES in D	N pro Punkt
1	20.000		*	→			46 D	2.000
2	20.000		*	→			46 D	2.000
3	20.000		*	→			46 D	2.000
4	20.000		*	→			46 D	2.000
5	20.000		*	→			46 D	2.000
6	20.000		*	→			46 D	2.000
7	20.000		*	→			46 D	2.000
8	20.000	▶		→			46 D	2.000
9	20.000	▶		→			46 D	2.000
10	20.000		*			↗	0 D	2.000
11	20.000		*			↗	0 D	2.000
12	20.000		*		↑		0 D	2.000
13	20.000		*		↑		0 D	2.000
14	2.500		*		↑		0 D	2.000
15	200		*		↑		0 D	2.000
16	200		*		↑		0 D	10.000
17	20.000		*			↗	46 D	4.000
18	20.000		*		↑		46 D	4.000
19	200		*		↑		46 D	4.000
20	20.000		*			↗	23 D	4.000
21	20.000		*		↑		23 D	4.000

In Abb. 9 ist das ungestörte Profil an der Stelle des Zählers gezeigt, wobei als ungestört folgender Zustand bezeichnet wird:

- **Zähler-Flansch** DN 40 mit Innendurchmesser: 43 mm
- **Anschlussrohr** vor dem Zähler DN mit Innendurchmesser 43 mm und einer Länge von 2 m (\approx 46 D), Anschlussrohr nach dem Zähler 43 mm und einer Länge von 1 m (\approx 23 D). Material der Rohre: V4A

Nach und vor der Ein- und Auslaufstrecke war eine entsprechende Erweiterung auf 100 mm vorgesehen, die dann letztlich in einen Rohr-Innendurchmesser von 150 mm eingeleitet wird. Vor der gesamten Prüfstrecke erfolgte eine Umlenkung des Wasserstromes um 180°. In Abb. 10 ist die relative Änderung des Profiles gegenüber dem ungestörten Zustand (siehe Abb. 9) dargestellt, in Abb. 11 jene unmittelbar nach einem Kugelhahn (0 D), nach 23 D und nach 46 D gezeigt. Es ist gut zu erkennen, dass eine Einlaufstrecke von 23 D keineswegs ein ausgebildetes Profil ergibt. Nach 46 D kann das ausgebildete Profil aber als sicher angenommen werden.

² In Tabelle 1 wird lediglich auf Messergebnisse verwiesen, bei der das LDV-System das Rohr horizontal durchstrahlt. Die Messungen in vertikaler Richtung sind analog und unterscheiden sich nur geringfügig von jenen in horizontaler Richtung. Für die präsentierten Messungen kann daher Zylindersymmetrie angenommen werden.

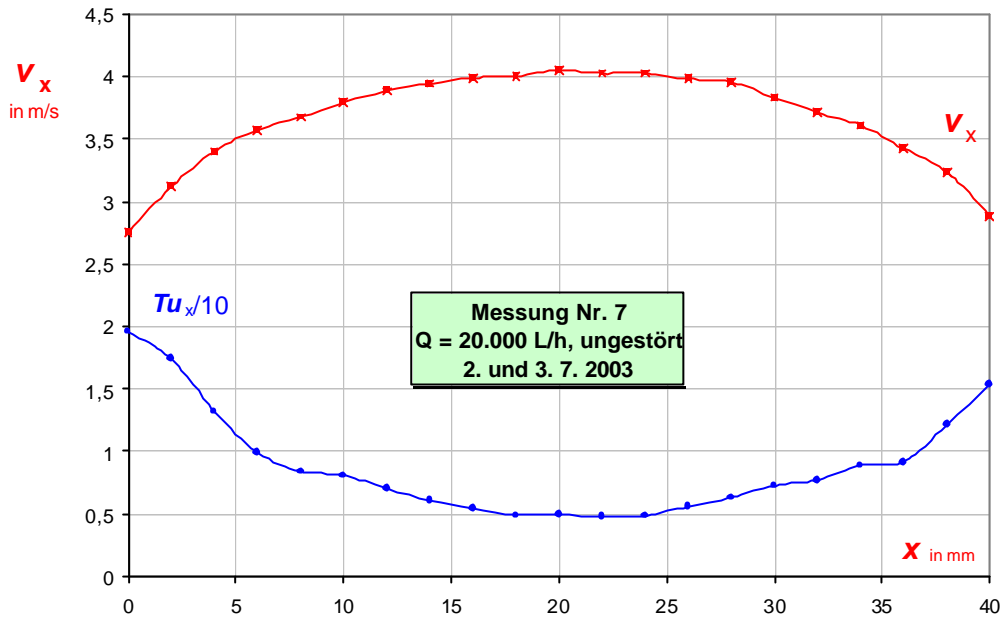


Abb. 9 Ungestörtes Geschwindigkeitsprofil an der Stelle der Montage des Prüflings: ungestörte Einlaufstrecke > 50 D, Auslaufstrecke etwa die Hälfte. Tu_x ... Turbulenzgrad x ... Richtung der mungsachse

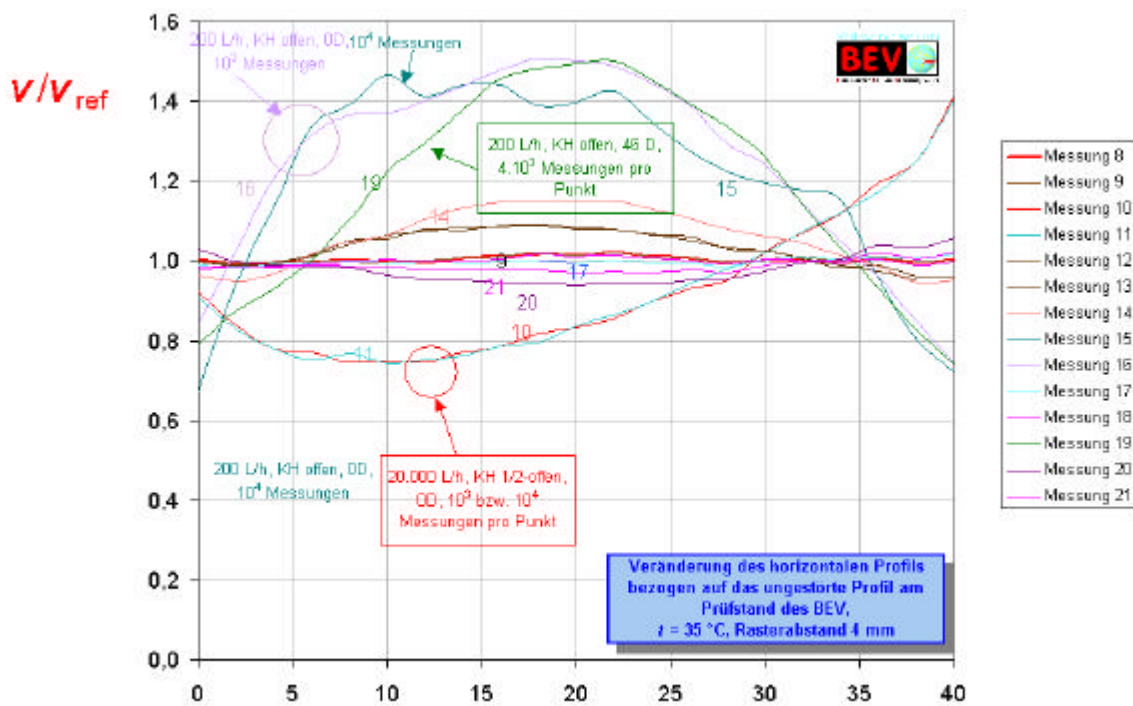


Abb. 10: Relative Änderung des Profiles (horizontal) gegenüber dem ungestörten Zustand. Die Bezeichnung der Messung entspricht jenen der Tabelle 1³

3 Vorläufige Bewertung

Die bisher präsentierten Ergebnisse sind als vorläufig anzusehen, daher auch deren Bewertung. Experimentell sind die Einflüsse von Störungen auf Fehlerkurven von Durchflussmessgeräten einigermaßen bekannt [3]; die Verknüpfung mit den Geschwindigkeitsprofilen konnte bisher nur an Hand

³ Die Messergebnisse bei einem Durchfluss von 200 L/h zeigen, dass man offenbar bereits im laminaren Bereich ist (siehe Tabelle 1, Messungen 15, 16 und 19)

eines Mehrstrahl-Flügelradzählers nachgewiesen werden, bei dem die Auswirkungen von Profilveränderungen eher gering sind (vergleiche dazu die Abb. 8 und 11).

Geplant sind daher künftig die folgenden Maßnahmen:

- Bau einer Fensterkammer DN 50 zur Untersuchung von Woltmanzählern der Bauarten WP und WS sowie Bau einer Fensterkammer DN 20, um die Untersuchung von Einstrahlzählern für den Wohnungsbereich zu ermöglichen, die in sehr großen Stückzahlen zur Wärmeenergiemessung verwendet werden und bekanntermaßen empfindlich sind gegenüber Störungen des Geschwindigkeitsprofils,
- Bau von standardisierten Rohr- und Raumkrümmern,
- Untersuchung der Wirkung unterschiedlicher Bauarten von Gleichrichtern im Sinne der Erreichung möglichst kurzer Einlaufstrecken, wie es die messtechnische Praxis erfordert.

Weitere Untersuchungen werden sich im Laufe des geplanten Messprogrammes ergeben und bei der nächsten GALA-Tagung präsentiert werden.

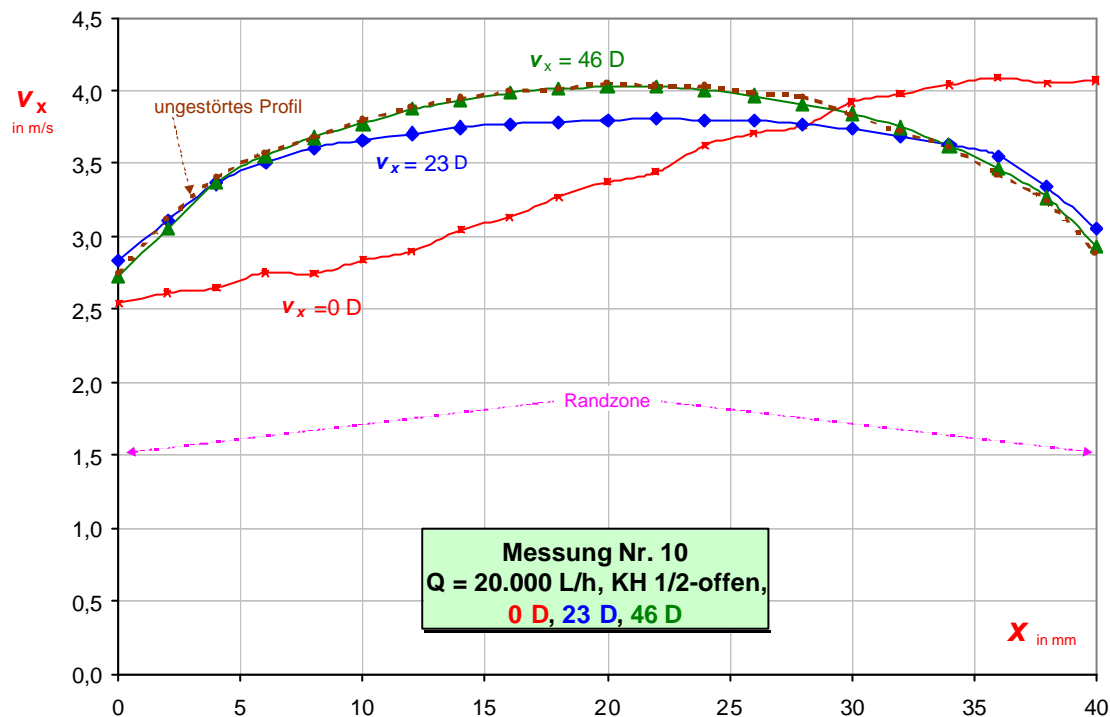


Abb. 11: Veränderung des Geschwindigkeitsprofils im Abstand 0 D, 23 D und 46 D nach einem halb geöffneten Kugelhahn⁴. Ebenfalls eingetragen ist das ungestörte Profil nach Abb. 9. Die Randzonen werden dadurch definiert, dass die Burstrate sehr gering ist, obwohl durch die Konstruktion der Fensterkammer bedingt, der tatsächliche Abstand zwischen den Fenstern größer ist als die Rohrdimension

Literatur

- [1] EN 1434:2003, Teil 1
- [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] Adunka, F. **Handbuch der Wärmeverbrauchsrechnung**, 3. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen, 1999
- [4] Adunka, F. **Messunsicherheitsbestimmung am Warmwasser-Durchflussprüfstand des BEV**, PTB-Seminar: Neue Entwicklungen bei der Kalibrierung von Durchflussmessgeräten, PTB-Braunschweig, 13. und 14. November 2001

⁴ Die Angabe **0 D** bedeutet natürlich nicht, dass der halb geöffnete Kugelhahn tatsächlich in der Strahlebene liegt. Für DN 40 ist der Abstand der Strahlebene von der Schnittlinie des halb geöffneten Kugelhahnes ca. 250 mm!