

## M7

# UNTERSUCHUNG DES STRÖMUNGSBILDES VOM KRÜMMER UND BESTIMMUNG SEINES VERLUSTBEIWERTES

### 1. Ziel der Messung

In den Rohrleitungen wird die Richtung der Strömungen durch Rohrkrümmer (Ellenbogen) geändert. Bei der Richtungsänderung treten bedeutende Verluste auf, zu deren Verzögerung schon mehrere Methoden zur Verfügung stehen. Das Ziel dieser Messung ist die Bestimmung des Strömungsverlustes für mehrere geometrische Varianten und die Auswahl der günstigsten Gestaltung.

### 2. Beschreibung der Messung

Der untersuchte Krümmer (Ellenbogen) hat einen Quadratquerschnitt der Größe 150x150 mm, durch den Luft mit Hilfe eines Ventilators geströmt wird. Der Kanal, der diesen Krümmer hat, ist mit dem Ventilator an der saugenden Seite verbunden. In den Krümmer strömt die Luft aus dem äußeren, in Ruhe stehenden Raum, durch einen abgerundeten Mündung (Einsaugöffnung), die praktisch verlustfrei betrachtet werden kann. So kann die Strömung vor dem Ellenbogen entsprechend gleichmäßig gemacht werden. An der Kanalwand nach dem Ellenbogen finden wir an beiden Seiten Druckmessstellen zur Messung des statischen Drucks. Die obere Wand des Kanals wurde aus Plexi gefertigt, so können wir

das Strömungsbild beobachten. Dafür dienen die Stecknadeln, die kurze Zwirnfäden haben und die in die untere Platte des Kanals eingestochen werden.

### Verlustbeiwert

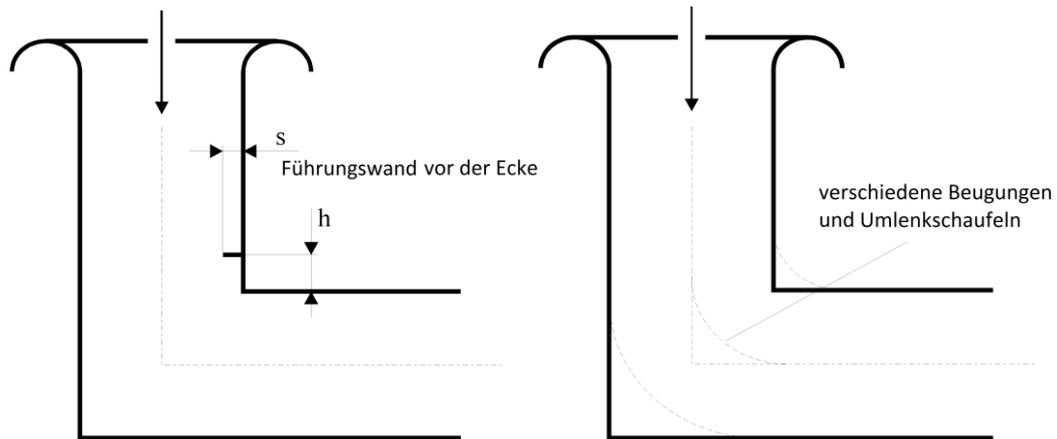
Die „Güte“ des Krümmers (Ellenbogens) wird folgenderweise charakterisiert: der Druckverlust wird mit einer Zahl, mit dem Verlustbeiwert  $\xi_k$  charakterisiert. Der Wert des Beiwertes hängt von dem entstehenden Strömungsbild, hauptsächlich von der Größe der sich ablösenden Zonen ab. Zur Veränderung der Richtung des Mediums im Krümmer (Ellenbogen), wegen der Reibungsverluste und wegen der Strömung der Ablösungszonen wird Überdruck benötigt. Durch Modifizieren dieser Faktoren kann  $\xi_k$  bedeutend verzögert werden. Diese Verzögerung kann durch Einbau verschiedener Elemente (Führungswände, Umlenkschaufeln) in den Ellenbogen erreicht werden:

- Durch den Vertausch der äußeren/inneren Ecke in gebogene Platten (Umlenkschaufeln) mit verschiedener Abrundung oder in ebene Platten positioniert zu  $45^\circ$ , oder es werden gebogene Führungswände zwischen der äußeren und der inneren Ecke des Ellenbogens gestellt.
- Eine andere Methode ist, wenn das Strömungsbild mit einer kleinen Umlenkschaufel (eingreifend in die Strömung) modifiziert wird (L-förmige Metallplatten werden an die Seitenwand befestigt). Mit dieser Methode können wir die Figur, die Position und die Größe der Ablösungszone verändern. Dadurch kann die den großen Druckverlust erzeugende Ablösungszone verzögert werden, so erhalten wir einen kleineren Verlustbeiwert, der Verlust des Ellenbogens verzögert auch. In diesem Fall muss die entsprechende Größe und Position der L-förmigen Führungswände bestimmt werden. Die Umlenkschaufel soll an die Seitenwand vor dem Krümmer (Ellenbogen) montiert werden, siehe Abb. 1.!

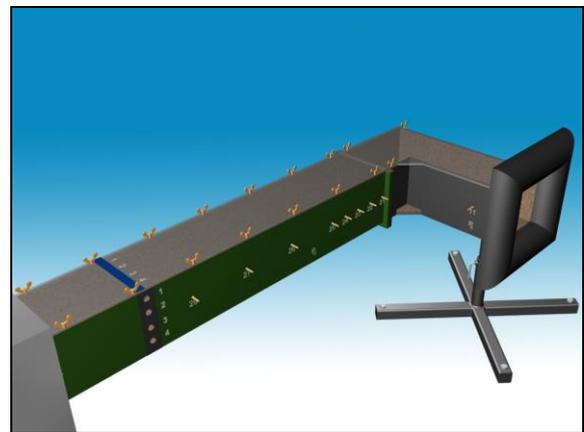
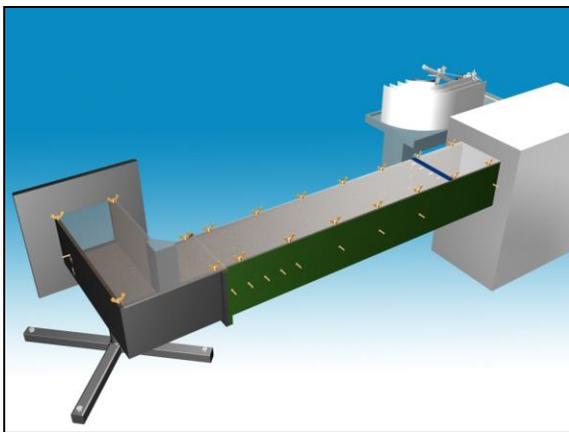
### Sichtbarmachung der Strömung

Die Messeinrichtung ist auch für die Sichtbarmachung des Strömungsbildes geeignet. Dieser Versuch kann mit den schon erwähnten Stecknadeln durchgeführt werden. Es ist zweckmäßig, die Veranschaulichung der Strömung als eine Zeichnung zu dokumentieren, damit sie im Messprotokoll oder bei der Messungspräsentation als Anlage verwendet werden kann.





1. Abb.: Möglichkeiten für die Ausbildung des Ellenbogens



### 3. Auswertung der Messergebnisse

Der Verlustbeiwert ist die Differenz des durch den  $p_{\text{dyn}}$  dynamischen Druck entdimensionierten Gesamtdrucks vor ( $p_{G,v}$ ) und nach ( $p_{G,n}$ ) dem Ellenbogen:

$$\xi_k = \frac{p_{G,v} - p_{G,n}}{\frac{\rho}{2} \bar{v}^2}$$

wo  $\rho$  die dichte des strömenden Mediums,  $\bar{v}$  die Geschwindigkeit im Querschnitt ist.

Die Durchschnittsgeschwindigkeit kann mit einem Prandtl-Rohr, anhand den Vorschriften der Punkt zu Punkt Geschwindigkeitsmessung bestimmt werden, gemessen in  $2 \times 2 = 4$  Punkten vom Querschnitt der Kanalstrecke vor dem Ellenbogen (siehe Punkt zu Punkt Geschwindigkeitsmessung). Zum Positionieren des Prandtl-Rohres befinden sich zwei Bohrungen an der Plexiplatte, wo die Messung in zwei Tiefen durchgeführt wird. Die Durchschnittsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  kann bei der Anwendung verschiedener Führungswände ein bisschen verändern, da diese Elemente den Betriebszustand des Ventilators - durch Beeinflussung des Verlustbeiwertes vom Krümmer - in kleinem Maße modifizieren können.

Während der Messung bestimmen wir den Volumstrom zuerst aus den dynamischen Druckwerten für die Kalibrierung:

$$q_v = A \cdot \bar{v} = L^2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^4 v_i}{4} = L^2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^4 \sqrt{\frac{2 \cdot p_{dyn,i}}{\rho}}}{4}$$

Danach wird das digitale Druckmessgerät folgenderweise angewandt: die eine Seite wird zur Leitung gebunden, die die zwei statischen Druckauslässe verknüpft, und mit der anderen Seite wird der Atmosphärendruck gemessen. Der so erhaltene Druckwert ist gleich - mit guter Annäherung - dem dynamischen Druck im Ellenbogen. In diesem Fall müssen wir aber eine Korrektur anwenden, da es Wandreibung bzw. Verluste beim Einsaugelement gibt.

Volumentstrom bei der Bohrung für den statischen Druckauslass:

$$q_v = k \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p_{gem}}$$

Bestimmung der Korrektur „k“:  $k = \frac{L^2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^4 \sqrt{\frac{2 \cdot p_{dyn,i}}{\rho}}}{4}}{A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{gem}}{\rho}}} = \frac{\sum_{i=1}^4 \sqrt{\frac{2 \cdot p_{dyn,i}}{\rho}}}{4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{gem}}{\rho}}}$

Wenn wir die k-Faktor schon kennen, brauchen wir das Prandtl-Rohr nicht mehr zu benutzen. Die Volumenströme werden mit Hilfe von  $\Delta p_{gem}$  und von den k-Faktoren bestimmt.

Zur Bestimmung des Verlustbeiwertes müssen wir die Gesamtdruckdifferenz zu messen:  $(p_{G,v} - p_{G,n})$ . Da wegen des konstanten Kanalquerschnitts die durchschnittliche Geschwindigkeit vor und nach dem Ellenbogen gleich ist (Kontinuitätsgesetz!), wird die daraus berechnete Differenz der dynamischen Druckwerte gleich 0. Bei der Bestimmung des Verlustbeiwertes können wir mit der Differenz der statischen Druckwerte berechnen. Im Nenner des Ausdrucks steht der aus der Durchschnittsgeschwindigkeit berechnete dynamische Druck.

$$\xi_k = \frac{p_{\text{össze}} - p_{\text{összu}}}{\frac{\rho}{2} \bar{v}^2} = \frac{(p_{st,e} + p_{din,e}) - (p_{st,u} + p_{din,u})}{\frac{\rho}{2} \bar{v}^2} = \frac{(p_{st,e} + \frac{\rho}{2} \bar{v}^2) - (p_{st,u} + \frac{\rho}{2} \bar{v}^2)}{\frac{\rho}{2} \bar{v}^2} = \frac{p_{st,e} - p_{st,u}}{\frac{\rho}{2} \bar{v}^2}$$

Was bedeutet der Messpunkt „vor“ und „nach“ dem Ellenbogen?

Während der Messung wird direkt die Druckdifferenz  $(p_{st,e} - p_{st,n})$  gemessen, da die eine Seite des digitalen Druckmessgerätes zu dem vor dem Ellenbogen befindlichen statischen Druckauslass gebunden wird, während die andere Seite zu den Wandbohrungen nach dem Ellenbogen verknüpft wird.

$p_{st,v}$ : Die Stelle der statischen Druckmessung vor dem Ellenbogen ist eindeutig, da es nur vernachlässigbar kleine Rückwirkungen von der Strömung im Ellenbogen gibt.

$p_{st,n}$ : Wo wird der Druck nach dem Krümmer (Ellenbogen) gemessen? Die Frage ist, bis zu welchem Punkt die Störung vom Ellenbogen wirkt, also mit in welchem Messpunkt gemessenen statischen Druckwert sollen wir berechnen? Es gibt mehrere (8-10) Druckauslässe an der Seitenwand des Kanals nach dem Krümmer, an denen die Druckverteilung des Kanals gemessen werden kann. Wenn wir die Druckverteilung darstellen, können wir durch Vergleich mit dem Strömungsbild (mit den Zwirnfäden) den Querschnitt des Kanals bestimmen, wo es keine Ablösungszonen wegen des Ellenbogens mehr gibt. Die Strömung schmiegt sich an beiden (äußere/innere bzw. rechte/linke) Seiten an die Wand zurück, die Stromlinien sind - mit guter Annäherung - parallel, also **sind die statischen Druckwerte an beiden Seiten gleich**. Das Geschwindigkeitsprofil ist aber hier noch nicht symmetrisch, also müssen wir den Querschnitt finden, wo der gemessene statische Druck nicht mehr ansteigt. Der zu diesem Querschnitt gehörende Druckwert kann als der statische Druck **nach** dem Ellenbogen betrachtet werden, anhand diesem Druckwert sollen wir den Verlustbeiwert des Krümmers (Ellenbogens) bestimmen. (Die zwei, vom Ellenbogen am weitesten befindlichen Messpunkte spielen keine Rolle, in diesen Punkten messen wir nicht, da die Strömung hier wegen des Ventilators asymmetrisch sein kann.)

Der Wert von  $\xi_k$  muss für die gewählten Umlenkschaufeln, oder für das L-förmige Führungswand untersucht werden. Während dem Versuch müssen wir die den  $\xi_{k,min}$ -Wert ergebende Gestaltung finden.

#### 4. Das Messprotokoll soll enthalten:

- Daten der Geschwindigkeitsmessung mit dem Prandtl-Rohr, Kalibration
- Die gemessenen Daten des statischen Drucks in Tabellenform, Darstellung der Druckverteilung in einem Diagramm entlang der Kanallänge ( $x$ [mm]) (zu messen sind die geometrischen Positionen der Druckauslässe!). In der Abbildung zwei Druckverteilungskurven (rechte und linke Seite), dargestellt in einem gemeinsamen Diagramm bei einer bestimmten Ellenbogeneinstellung.
- Zeichnung von dem Strömungsbild mit den Stecknadeln (und Fäden).
- Aus den Daten soll bestimmt werden, wo die Strömung an die Seitenwand zurückschmiegt und wo das Geschwindigkeitsprofil symmetrisch ist. Für diesen Punkt (Querschnitt) soll der Verlustbeiwert des Krümmers (Ellenbogens) berechnet werden.
- Für jede untersuchte Umlenkschaufel oder Krümmer sollen die Verlustbeiwerte, die gegebenen Daten und die berechneten Ergebnisse ähnlicherweise angegeben werden.
- Die Verlustbeiwerte der verschiedenen Umlenkschaufeln sollen analysiert werden, z. B. in Tabellenform oder graphisch in einem Diagramm dargestellt, präsentierend die günstigste und die ungünstigste Gestaltung. **DER GRUND DES VERGLEICHS IST DER LEERE KRÜMMER (ELLENBOGEN), VERGESSEN WIR ALSO NICHT, DEN KRÜMMER MIT DEM „GRUND“GESTALTUNG ZU MESSEN! Die weiteren Messergebnisse werden mit dem Verlustbeiwert dieses Krümmers verglichen, die Auswertung der verschiedenen Gestaltungen wird anhand diesem Krümmer durchgeführt, also in den Diagrammen soll dieser Verlustbeiwert immer dargestellt werden!**
- Auswertung und Analyse der Messergebnisse in einigen Sätzen.
- Fehlerberechnung für die Verlustbeiwerte des Krümmers (Ellenbogens), Darstellung auch! (Zu den Verlustbeiwerten gehörende Fehlerindikatoren sollen auch dargestellt werden.)

**Fehlerberechnung**

Der Verlustbeiwert des Krümmers (Ellenbogens):

$$\zeta_k = \frac{\Delta p_G}{\frac{\rho}{2} \bar{v}^2} = \frac{p_{st,v} - p_{st,n}}{\frac{\rho}{2} \left( \frac{q_v}{A} \right)^2} = \frac{p_{st,v} - p_{st,n}}{\frac{\rho}{2} \left( \frac{\sum_{i=1}^4 A_i \cdot v_i}{A} \right)^2} = \frac{p_{st,v} - p_{st,n}}{\frac{\rho}{2} \left( \frac{\sum_{i=1}^4 v_i}{4} \right)^2} = \frac{p_{st,v} - p_{st,n}}{\frac{\rho}{2} \left( \sqrt{\frac{2 p_{dyn}}{\rho_l}} \right)^2} = \frac{p_{st,v} - p_{st,n}}{p_{dyn}}$$

wo  $p_{dyn}$  der aus der Durchschnittsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  bestimmte dynamische Druck ist.

Berechnung des absoluten Fehlers:  $\delta \zeta_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \delta X_i \cdot \frac{\partial \zeta_k}{\partial X_i} \right)^2} = ?$

wo  $X_i$  die gemessenen Größen und die dazu gehörenden Messfehler sind.

$$X_1 = p_{Ges,v} - p_{Ges,n} = p_{st,v} - p_{st,n} = \Delta p_{st}$$

$$\text{Fehler des digitalen Druckmessgerätes: } \delta p_{Gerät} = 2 Pa$$

$$X_2 = p_{dyn}$$

$$\text{Fehler des digitalen Druckmessgerätes: } \delta p_{Gerät} = 2 Pa$$

Berechnung des relativen Fehlers:  $\frac{\delta \zeta_k}{\zeta_k} = ?$

Zum Verlustbeiwert sollen im Protokoll der Wert des absoluten und auch des relativen Fehlers angegeben werden.

**Während der Messung darf man nicht vergessen:**

- Vor dem Einschalten der Messeinrichtung, und während des Betriebes der Messeinrichtung muss man davon überzeugt werden, dass der Betrieb unfallfrei ist. Man muss die anderen darauf aufmerksam machen, dass die Messeinrichtung eingeschaltet wird oder während der Messung etwas verändert wird.
- Aufschreiben des Atmosphärendrucks und der Raumtemperatur.
- Aufschreiben der Messeinheiten der von den angewandten Messeinrichtungen abgelesenen Werte und der Faktoren, die sich auf diese Messeinheiten beziehen (z.B. Schrägungsfaktor des Schrägrohrmanometers).
- Aufschreiben des Typs und der Seriennummer des Messgerätes, und Aufschreiben der Dichte der Flüssigkeit im Messgerät.
- Die Messeinheiten der vom Messgerät abgelesenen Größen und der bei der Berechnung angewandten Größen müssen aufeinander abgestimmt werden.
- Die U-Rohr-Mikromanometer dürfen nur entsprechend ausgeglichen benutzt werden (Pegel stimmen überein).
- Wir sollen aufmerksam bei der Einbindung des Druckmessgerätes und bei der Auswahl der + und - Seiten, bzw. der Messgrenze sein. Im allgemeinen bei allen Manometertypen, aber besonders bei dem Schrägrohrmanometer muss man darauf achten, dass das Gummirohr auf die Anschlussstücke des Druckmessers vorsichtig hinaufgesetzt werden soll. Man muss dabei das Benehmen der Messflüssigkeit folgen. Wenn die Auslenkung der Messflüssigkeit vor der Befestigung der Anschlussrohre den Maximalwert annähert, soll die Messgrenze des Messgerätes möglicherweise geändert werden. Wenn das nicht behilflich sein kann, dann soll ein für die Messung größerer Druckwerte geeignetes Messgerät gewählt werden. Gegenfalls strömt sich die Messflüssigkeit ins Anschlussrohr und verfälscht oder verunmöglicht so die Messung.
- Bei der Aufmontierung der Messblende muss auf die luftdichte Montierung geachtet werden, da durch die eventuell entstehenden Risse Luft aus- bzw. einströmen kann, die die Messergebnisse dadurch verschlimmert.
- Die U-Rohr-Mikromanometer dürfen nur entsprechend ausgeglichen benutzt werden (Pegel stimmen überein).
- Die Gummi- und Silikonenteile bzw. -rohre müssen vor der Messung und eventuell während der Messung überprüft werden, ob sie keine Risse und keinen Bruch haben, da mit solchen Messrohren werden alle bisherigen Messergebnisse verlorengehen. Diese Überprüfung kann mit dem Auge oder durch Druckprobe durchgeführt werden. Kritische Punkte sind die Anschlussstellen an Druckauslässe oder an Geräte.

**Literatur**

Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai (*Grundlagen der Strömungslehre*), Műegyetemi Kiadó, Budapest 2004, Kapitel 13. Hidraulika (*Hydraulik*)