

## Technische Aspekte von Turbinen-Durchflussmessern

### Kalibrierung und Grundlagen der UVC-Kalibrierung

von: A. Trigas  
TrigasFI GmbH, Nov. 2018

Wie jedes andere Messgerät, so zeigt auch ein Turbinen-Durchflussmesser bei physikalischen Messaufgaben gewisse Nebeneffekte auf, die für die Messaufgabe nicht erwünscht sind. Eigentlich nur für das Messen von Durchflussmengen oder -volumina konzipiert, reagiert ein Turbinen-Durchflussmesser nämlich auch auf die Viskosität, die Dichte und die Fließgeschwindigkeit des Fluids. Nachfolgend nun eine kurze technische Erläuterung über den Effekt der Abhängigkeit von Turbinen-Durchflussmessern gegenüber der Viskosität und eine Beschreibung der UVC-Methode, mit der eine Kompensation dieses Effekts ermöglicht wird.

#### **Dynamische Viskosität**

Die dynamische Viskosität  $\eta$  (griech. Eta), auch gelegentlich  $\mu$ , ist das Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids. Die Maßeinheit hierfür lautet **mPa.s** (früher cP Centipoise). Je größer der Zahlenwert der Viskosität desto dickflüssiger ist das Fluid.

Wasser und Benzin z.B. sind Fluide mit relativ geringer Viskosität, sie fließen sehr leicht und werden häufig als nahezu reibungsfrei bezeichnet. Motorenöl und Honig z. B. sind Fluide mit höherer Viskosität, sie sind also dickflüssiger. Gerade beim Honig ist es seine hohe Viskosität, die ihn daran hindert im kalten Zustand aus dem Glas zu fließen.

Ein Ansteigen der Viskosität erfordert eine größere Kraft um ein Fluid in Fluss oder Bewegung zu bringen. Ein Anstieg der Viskosität erfordert also gleichwohl einen höheren Energieaufwand um ein Fluid mit der gleichbleibenden Menge zu transportieren. Andererseits erhöht sich der Durchfluss des Fluids bei konstantem Förderdruck und sinkender Viskosität

Die dynamische oder auch absolute Viskosität  $\eta$  eines Fluids ist sehr stark temperaturabhängig. Ein Absinken der Temperatur bewirkt gleichzeitig eine Erhöhung der dynamischen bzw. absoluten Viskosität  $\eta$ . Deshalb haben Temperaturänderungen des Fluids maßgeblichen Einfluss auf die Messergebnisse von Turbinen-Durchfluss-messern.

#### **Kinematische Viskosität**

Das Verhältnis zwischen dynamischer Viskosität  $\eta$  und Dichte  $\rho$  des Fluids wird als kinematische Viskosität  $\nu$  definiert. Die Maßeinheit hierfür lautet **mm<sup>2</sup>/s** (früher cSt Centistoke)

$$\nu = \eta / \rho$$

Die kinematische Viskosität ist die für die Anwendung von Turbinen-Durchflussmessern entscheidend!

#### **Effekte durch Temperatur und Druck**

Wie bereits erwähnt, ist die dynamische Viskosität  $\eta$  eines Fluids sehr stark temperaturabhängig. Nicht nur bei Fluiden, auch bei Gasen bewirkt das Absinken der Temperatur einen Anstieg der dynamischen Viskosität  $\eta$ .

Bei niedrigen Drücken im System ist der Einfluss auf die dynamische Viskosität  $\eta$  vernachlässigbar. Ein Druck von  $> 70$  bar wiederum hat einen messbaren Einfluss auf die dynamische Viskosität  $\eta$ .

Die kinematische Viskosität  $\nu$  - als Quotient aus dynamischer Viskosität  $\eta$  und jeweiliger Dichte  $\rho$  – wird sowohl durch Druck, als auch durch Temperaturänderungen entscheidend beeinflusst. Die kinematische Viskosität  $\nu$  zeigt hierbei eine proportionale Abhängigkeit von Druck und Temperatur. Bei Gasen sind die Dichte und konsequenterweise die kinematische Viskosität  $\nu$  sehr stark druckabhängig.

Es ist also definitiv die kinematische Viskosität  $\nu$ , die die Funktion und Wirkungsweise eines Turbinen-Durchflussmessers maßgeblich beeinflusst.

## Reynolds-Zahl – Laminare und turbulente Strömung

Beim Fließverhalten von Fluiden unterscheidet man zwischen laminarer und turbulenter Strömung.

Bei einer laminaren Strömung fließt das Fluid in sog. „Schichten“, diese gleiten fast reibungslos übereinander. Es herrscht keine Durchmischung zwischen den „Schichten“, da die Trägheitskräfte die Relativbewegung zwischen den „Schichten“ dämpfen. Da jede einzelne „Schicht“ des Fluids im Grunde neben der anderen benachbarten „Schicht“ liegt, steigt mit dem Abstand zur Rohrwandung die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids (Wandreibung). Daraus entsteht eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung im Rohr.

Bei einer turbulenten Strömung sind keine getrennten „Schichten“ im Fluid mehr vorhanden. Die Bewegungsenergie des Fluids überwindet die Trägheitskräfte und es kommt zur dauerhaften und steten Durchmischung im Massestrom. Das nun existierende Strömungsprofil im Rohr wird flacher.

Als Kennzahl (dimensionslos) für die Beurteilung, ob eine laminare oder turbulente Strömung vorliegt, wird die Reynolds-Zahl **Re** verwendet.

Definition:

$$\mathbf{Re} = \mathbf{d} \cdot \mathbf{V} \cdot \rho / \eta \quad \text{mit } \mathbf{\nu} = \eta / \rho$$

$$\mathbf{Re} = \mathbf{d} \cdot \mathbf{V} / \nu$$

Wobei:

- d** = Rohrinne Durchmesser
- V** = Strömungsgeschwindigkeit des Fluids
- $\rho$**  = Dichte des Fluids
- $\nu$**  = kinematische Viskosität
- $\eta$**  = dynamische Viskosität

Der Zähler in der Reynolds-Zahl steht in direktem Bezug zur Trägheitskraft des Fluids. Im Nenner steht die kinematische Viskosität des Fluids und bezieht sich damit unmittelbar auf die herrschenden Zähigkeitskräfte (Viskosität) im Fluid.

Die Reynolds-Zahl drückt also das Verhältnis zwischen Trägheitskräften und Zähigkeitskräften (Viskosität) aus.

Da große Trägheitskräfte (Geschwindigkeit) mit einer turbulenten Strömung und andererseits große Zähigkeitskräfte (Viskosität) mit einer laminaren Strömung in Zusammenhang stehen, so ist zu erwarten, dass eine hohe Reynolds-Zahl auf eine turbulente Strömung hinweist. Im Gegensatz dazu weist eine niedrige Reynolds-Zahl auf eine laminare Strömung hin.

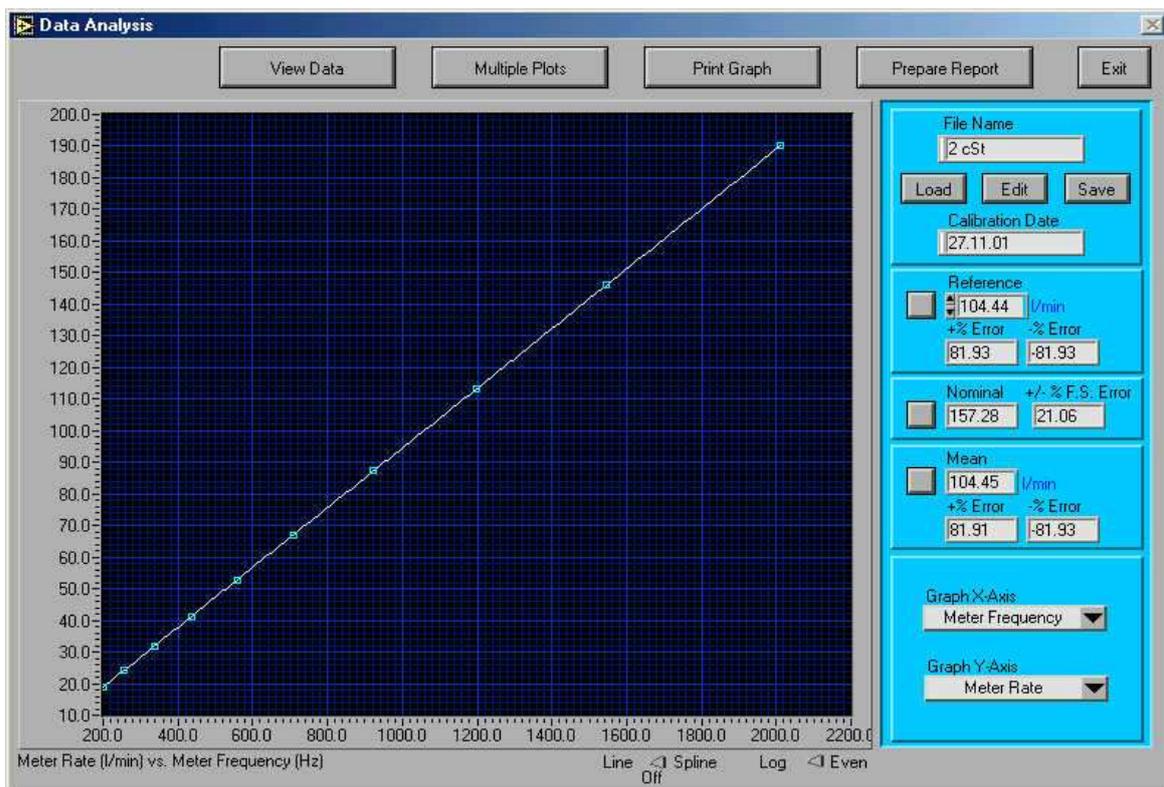
Der Übergang von einer laminaren in eine turbulente Strömung findet in der Hydraulik bei einer Reynolds-Zahl zwischen 2.000 und 4.000 statt. Eine Reynolds-Zahl von  $> 5.000$  weist eindeutig auf eine turbulente Strömung hin.

## Reibungswiderstand an Turbinen-Durchflussmessern

An allen inneren Oberflächen des Turbinen-Durchflussmessers, mit denen das Fluid in Verbindung kommt, entstehen Reibungswiderstände, und zwar nicht nur an der Gehäuseinnenwand, sondern auch in den Lagern des Rotors und an den Rotorblättern selbst. Der Reibungswiderstand entsteht auf der Oberfläche der Rotorblätter und erzeugt dort auf den Rotor sowohl eine Axialkraft in Flussrichtung als auch ein Verzögerungsmoment. Aufgrund der Verzögerungskraft durch das viskose Medium beginnt sich der Rotor bei einem hochviskosen Medium nicht so schnell zu drehen wie bei einem niedrigviskosen Medium. Der Rotor gleitet oder schwimmt eigentlich im Flüssigkeitsstrom und die Rotorblätter lenken die Flüssigkeit leicht ab. Ein Resultat dieses Gleitens ist, dass die Rotationsbewegung des Rotors verzögert wird. Dieses Gleiten oder Schwimmen des Rotors ist sowohl von der kinematischen Viskosität des Fluids als auch von dessen Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Daraus folgt, dass die Arbeitsweise eines Turbinen-Durchflussmessers von der Reynolds-Zahl abhängig ist, die an sich wiederum die Art der aktuellen Strömung beschreibt.

Der Reibungswiderstand ist auch ein Grund für den Druckverlust, der über den Turbinen-Durchflussmesser entsteht. Ansteigende Viskositätswerte begrenzen hierbei die maximal erreichbaren Durchflusswerte.

## Prinzip der UVC- Kalibrierung (Universal Viscosity Calibration)



Die Kalibrierung eines Turbinen-Durchflussmessers besteht primär darin, die Ausgangs-/Drehfrequenz ( $f$  in Hz) der zu messenden Turbine bei spezifischen Durchflussraten aufzuzeichnen. Die Durchflussraten werden in einem Kalibriersystem erzeugt.

Bild 1: Darstellung  $Q$  (l/min) zu Frequenz  $f$

Werden die nunmehr erhaltenen Kalibrierdaten, wie in Bild 1 dargestellt, in ein einfaches Koordinatensystem übertragen, erhält man eine Gerade. Diese Darstellung ist aber nur grob und kann die Abweichungen vom linearen Verhalten, die gerade im unteren Messbereich der Turbine auftreten, nicht aufzeigen.

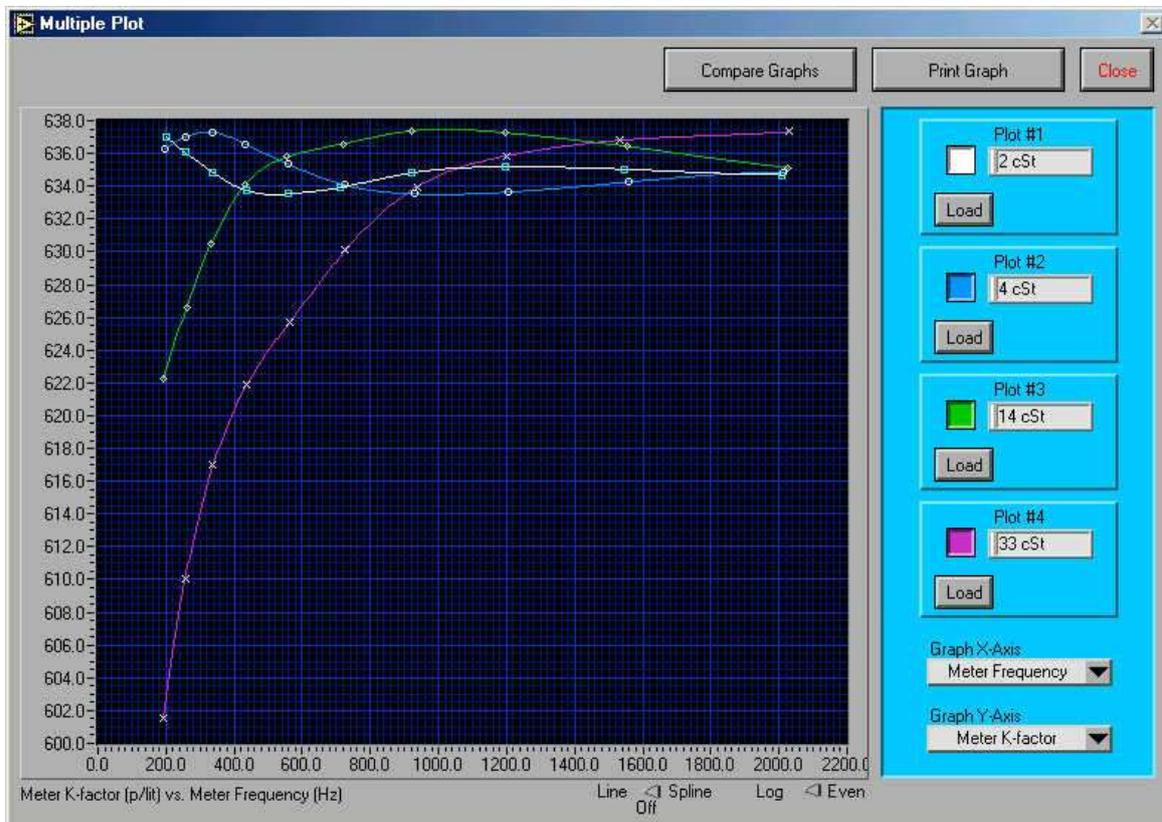


Bild 2: Darstellung K-Faktor (Pulse/l) gegenüber Frequenz

Eine geeignetere Veranschaulichung der erhaltenen Kalibrierdaten ist der sog. K-Faktor:

$$K = f \cdot 60 / Q \text{ (Pulse/l)}$$

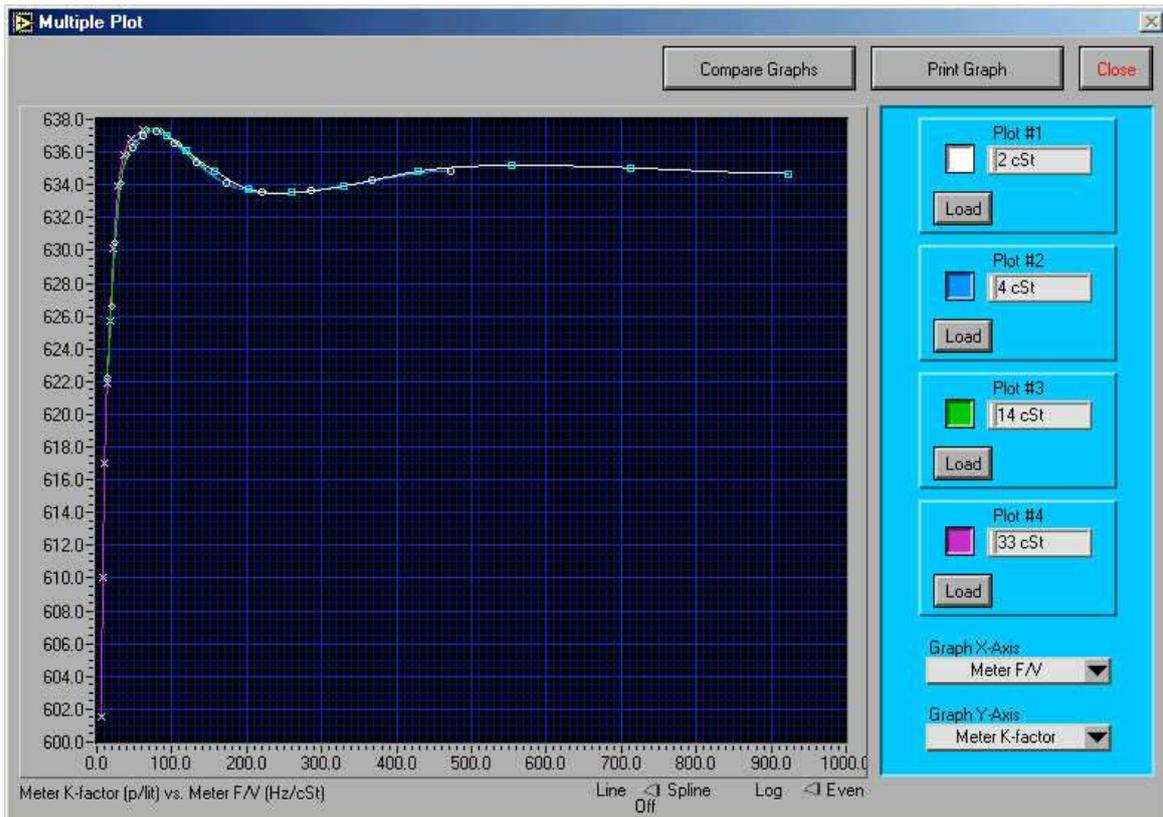
Wenn der K-Faktor nun gegenüber der Frequenz **f** oder dem Durchfluss **Q** aufgetragen wird, gleicht der lineare Bereich des Turbinen-Durchflussmessers einer horizontalen Gerade. Dies kann man in Bild 2 erkennen, bei dem Kalibrierdaten einer Turbine bei verschiedenen Viskositäten aufgezeichnet wurden. Daran lässt sich sehen, dass der K-Faktor nur im oberen Bereich der Frequenzwerte (abweichend durch verschiedene Viskositäten) mit einer Abweichung +/- 0,5% konstant bleibt. Tatsächlich gehen aber viele Anwender von einem konstanten K-Faktor ihrer Turbinen-Durchflussmesser aus und wenden folgende Gleichung für die Ermittlung der Durchflussmenge ohne Berücksichtigung der Frequenz an.

$$Q = f \cdot 60 / K$$

Das ist ein akzeptables Näherungsverfahren, wenn die Turbinen-Durchflussmesser innerhalb ihres linearen Bereichs (üblicherweise 10:1) gefahren werden. Wie auch immer, diese weiterentwickelte Darstellung erfasster Kalibrierdaten ermöglicht es nicht, einfach die Viskositätseffekte auszugleichen (Bild 2).

Da jede Viskosität in einer eigenen Messkurve (Line) abgebildet wird, gestaltet sich eine Bewertung der Messergebnisse bzw. der Leistungsfähigkeit des Turbinen-Durchflussmessers als äußerst schwierig. Ausnahme bildet nur der Anwendungsfall einer einzigen Viskosität, der sehr leicht Rückschlüsse in Bezug auf die Leistung eines Durchflussmessers gibt. Deshalb muss bei der Kalibrierung von mehreren Viskositäten die Messkette graphisch interpoliert werden, um exakte Ergebnisse zu erhalten.

Unter Anwendung des entwickelten Prinzips der “**Universal Viscosity Curve (UVC)**“ kann dieser Effekt kompensiert und einheitlich in einer Kurve dargestellt werden.



Wie nachfolgend in Bild 3 ersichtlich, sind hier die Kalibrierdaten der Turbine im Verhältnis von **K-Faktor gegenüber f/v** (Frequenz / kinematische Viskosität) aufgetragen

Bild 3: Darstellung K Faktor (Pulse/l) gegenüber. f/v (Hz/mm<sup>2</sup>/s)

Die Verwendung des Verhältnisses f/v (Frequenz/kinematische Viskosität) liegt darin begründet, dass dieser Quotient einerseits zur Reynolds-Zahl und damit andererseits zu allen Strömungsbedingungen direkt proportional ist. Daher ist die UVC im Wesentlichen der Ausdruck von gemessenem Durchfluss (Pulse/Liter) gegenüber der Reynolds-Zahl. Als solches widerspiegelt dieser Ausdruck die zusammenhängenden Effekte von Strömungsgeschwindigkeit, Dichte und dynamischer Viskosität, die auf das Messgerät einwirken. Die beiden Letztgenannten, Dichte und dynamische Viskosität, sind durch die Verwendung der kinematischen Viskosität v in einem einzigen Parameter zusammengefasst.

Die "Universal Viscosity Curve (UVC)" wird durch Auftragen des Verhältnisses

$$K / f/v$$

für mehrere Viskositäten innerhalb der verwendeten Viskositätsbereiche des Durchflussmessers gebildet. Typischerweise werden 10 Punkte pro Viskosität aufgenommen. Die Anzahl der Viskositäten variiert und ist abhängig von den jeweiligen Anforderungen der Applikation. Als „Faustregel“ gilt, dass zwei aufeinanderfolgende Viskositäten nicht mehr als um den Faktor 10 auseinander liegen sollten.

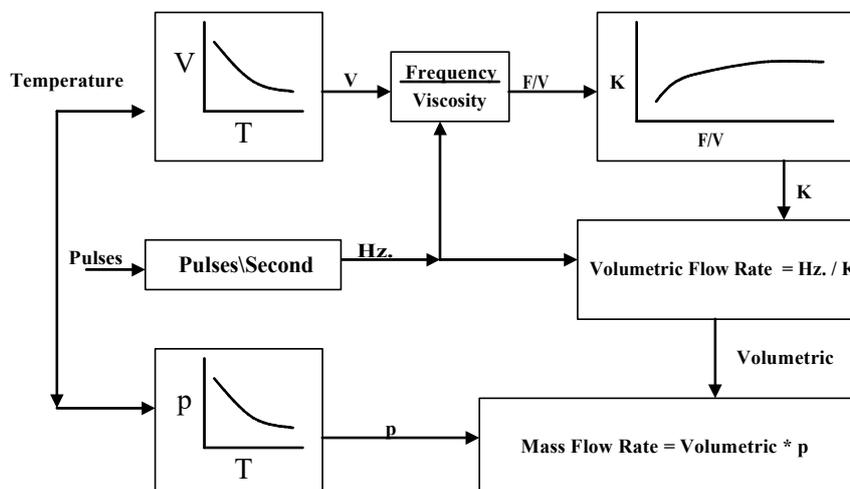
Zum Beispiel: Wird im Einsatzfall eine Viskosität zwischen 1 mm<sup>2</sup>/s und 100 mm<sup>2</sup>/s erwartet, wird eine UVC3-Kalibrierung aufgenommen und zwar bei 1 mm<sup>2</sup>/s; 10 mm<sup>2</sup>/s und bei 100 mm<sup>2</sup>/s. Wenn ein Viskositätsbereich von 3 mm<sup>2</sup>/s bis 40 mm<sup>2</sup>/s abgedeckt werden muss, dann sollten die jeweiligen Kalibrierungen bei 3 mm<sup>2</sup>/s; 10 mm<sup>2</sup>/s und bei 40 mm<sup>2</sup>/s aufgenommen werden. In diesem Fall wäre es aber auch möglich, nur die Viskositäten bei 3 mm<sup>2</sup>/s und bei 40 mm<sup>2</sup>/s aufzunehmen, man erhält dann immer noch vernünftige Ergebnisse.

Die Kalibrierungspunkte der verschiedenen Viskositäten innerhalb der UVC-Kalibrierung werden auf einem gemeinsamen Graphen aufgetragen um hier eine glatte Kurve bilden zu können (siehe Bild 3). Diese einzige UVC-Kurve kann nun verwendet werden um die Ergebnisse des Durchflussmessers mit hoher Genauigkeit vorauszuberechnen und zwar unter allen Bedingungen innerhalb der kalibrierten Viskositätsbereiche.

Unter Anwendung der UVC-Prinzipien kann der Volumenstrom aus den gemessenen Ausgangsfrequenzen des Durchflussmessers und den entsprechenden Viskositäten aus den nachfolgend gezeigten Schritten in Bild 4 und 5 ermittelt werden und zwar für Gas- und Flüssigkeitsanwendungen gleichermaßen:

- Gemessene Ausgangsfrequenz **f** am Durchflussmesser in Hz
- Gemessene kinematische Viskosität **v** oder errechnete kinematische Viskosität unter Verwendung von Temperatur und Viskositätstabelle
- Berechnung des Verhältnisses **f/v**
- Überleiten vom bekannten Verhältnis **f/v** zur Kurve **K ggü. f/v**
- Aus erhaltener Kurve K-Faktor bestimmen
- Berechnen: **l/min = Hz\*60/K**

Bild 4: Flüssigkeitskalibrierung unter Verwendung von UVC



## Einschränkungen der UVC-Methode

Die UVC-Methode ist ein sehr wirksames Instrument um einen genauen Durchfluss bei Turbinen-Durchflussmessern zu bestimmen. Sie hat jedoch Einschränkungen, die im Auge behalten werden sollten.

Die wesentlichste Einschränkung ist, dass sie nur über den linearen Bereich des Turbinen-Durchflussmessers anwendbar ist. Das bedeutet, dass innerhalb eines Durchflussbereichs von 10:1 und vielleicht bis zu 30:1 im oberen Durchflussbereich der Turbinen-Durchflussmesser, je nach Typ und Hersteller, eine +/- 0,5% Genauigkeit aufrechterhalten werden kann. Außerhalb dieses Bereichs driften die Kurven auseinander und es wird schwieriger, eine zuverlässige Messung zu gewährleisten. In der Regel wird eine Analyse der Kalibrierdaten dabei helfen, die Durchflusswerte und Viskositäten zu bestimmen, welche die UVC-Kalibrierung im Rahmen des Kalibrier-Prozesses erzeugen wird.

Auf dem Markt sind verschiedene Hilfsmittel und Tools erhältlich, wie z. B. der UVC-Editor der Firma TrigasFI ([www.trigasfi.com](http://www.trigasfi.com)), die dazu verwendet werden können, die UVC-Konzepte im täglichen Gebrauch bei Durchflussmessungen wirksam umzusetzen.

Eine andere Einschränkung der UVC-Methode ist, dass sie zwar die verschiedenen Viskositäten kompensiert - hervorgerufen durch Temperaturänderungen und/oder Druckänderungen – aber sie kann nicht die Druck- und Temperaturänderungen kompensieren, die z. B. durch Ausdehnung des Durchflussmesserkörpers entstehen. Es gibt hier aber andere Wege und Möglichkeiten diesen Effekt zu berücksichtigen.

An dieser Stelle sei die Roshko / Strouhal-Methode genannt, die in verschiedenen Publikationen veröffentlicht wurde. Diese hat sich wirksam als zusätzliche Methode zur Erhöhung der Messgenauigkeit bei Turbinen-Durchflussmessern erwiesen. Siehe Literaturnachweis.

## Implementierung der UVC-Methode bei TrigasFI/DM

Für die UVC-Implementierung ist ein Durchflussmesser erforderlich, der mit einem Signalaufbereiter gekoppelt ist, der das Durchflusssignal und das Temperatursignal verarbeitet und die erforderlichen Berechnungen durchführen kann.

Nachdem der Kunde den Betriebsviskositätsbereich des Durchflussmessers definiert hat, bestimmt das Engineering-Team von TrigasFI die Viskositäten, unter denen der Durchflussmesser kalibriert werden muss, und die Durchflussbereiche, die erforderlich sind, um den erforderlichen Frequenz/Viskositäts-Bereich abzudecken.

Die gewünschten Viskositäten können durch Mischen von Flüssigkeiten unterschiedlicher Viskositäten und / oder durch Abkühlen oder Erwärmen solcher Flüssigkeiten hergestellt werden, bis der erforderliche  $\text{mm}^2/\text{s}$ -Wert erreicht ist.

Wenn die Betriebsviskosität zu niedrig ist und nicht im Labor hergestellt werden kann, kann eine Extrapolation durchgeführt werden, um den erforderlichen Frequenz/Viskositäts-Bereich abzudecken.

Die Kalibrierungen bei den verschiedenen Viskositäten werden dann im TrigasFI Labor am Kalibrator durchgeführt. Die Rohdaten (mindestens 10 Punkte pro Viskosität) werden gespeichert.

Nach Abschluss der letzten Kalibrierung werden der Durchflussmesser und das zugehörige Signalaufbereitungsgerät an das Elektroniklabor weitergeleitet.

Dort werden die Kalibrierdaten der einzelnen Viskositäten zu einer einzigen UVC-Kurve (Universal Viscosity Curve) verarbeitet. Beim Erzielen einer glatten kombinierten Kurve können Datenpunkte aus der UVC-Tabelle entfernt werden. Wie oben erwähnt, kann eine Extrapolation auch für sehr niedrige Betriebsviskositäten erforderlich sein.

Sobald die Datenverarbeitung abgeschlossen ist, wird ein Bericht mit den aktuellen Kalibrierdaten der UVC für die Vorlage an den Kunden erstellt. Zur Vereinfachung werden keine Berichte über die einzelnen Viskositätskalibrierungen erstellt, obwohl die Daten dauerhaft in den Archiven bei TrigasFI gespeichert werden.

Anschließend werden die UVC-Daten in den zugehörigen Signalaufbereiter programmiert. Um sicherzustellen, dass keine Fehler bei der Programmierung aufgetreten sind und die Elektronik ordnungsgemäß funktioniert, wird ein Bench-Test durch Simulieren der Frequenz- und Temperatureingaben durchgeführt. Die Eingänge und die entsprechenden Signalaufbereitungsausgänge werden aufgezeichnet und ein Bericht wird erstellt, der den UVC-Kalibrierungsbericht begleitet.

Normalerweise ist damit der Prozess der Implementierung der UVC-Kalibrierung abgeschlossen.

Es gibt jedoch Fälle, in denen eine Kalibrierung der „Messkette“ wünschenswert ist. In diesem Fall und auf spezielle Kundenanforderung wird die Baugruppe aus Durchflussmesser und Elektronik wieder auf den Durchflusskalibrator gesetzt und eine neue Kalibrierung durchgeführt, um sicherzustellen, dass eine ordnungsgemäße Durchflussmessung unter tatsächlichen Prozessbedingungen gewährleistet ist.

## Literaturnachweis

1. Mattingly, G. E., Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 97, Number 5, Sept.-Oct. 1992, The Characterization of a Piston Displacement-Type Flowmeter Calibration Facility and the Calibration and Use of Pulsed Output Type Flowmeters.
2. Streeter, Vistor, L. Fluid Mechanics, Fourth Edition, McGraw-Hill, 1966.
3. Sargent, L.B., Jr. Significance of Viscosity Studies of Fluid Lubricants at High Pressure. Lubrication Engineering. July-August 1955, pp. 249-254
4. Hoerner, Sighard F. Fluid Dynamic Drag. Published by Hoerner Fluid Dynamics, 2 King Lane, Brick Town, N.J. 98723.
5. Rubin, M., Miller, R.W., and Fox, W.G. Driving Torques in a Theoretical Model of a Turbine Meter, Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering, Paper Number 64 - WA/FM-2, 1965
6. Marks, Lionel, S., and Baumeister, T. Mechanical Engineers Handbook, McGraw-Hill Book Co., Eighth Edition, 1978
7. Miller, Richard W., Flow Measurement Engineering Handbook, McGraw-Hill Book Co., Second Edition, 1989
8. FTI Flow Technology, EB-88251