

# Kalibrierung einer Rohrprüfstrecke nach unterschiedlichen Verfahren

Helmut Többen  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Fachlaboratorium für Flüssigkeitsmessgeräte  
Bundesallee 100  
D-38116 Braunschweig  
helmut.toebben@ptb.de

## Kurzfassung

Für die Nachkalibration einer Rohrprüfstrecke, die als volumetrische Normalmesseinrichtung im Hydrodynamischen Prüffeld eingesetzt wird, wurden zwei unterschiedliche z. T. erstmalig realisierte Messverfahren entwickelt. Diese Messverfahren und erste hiermit gewonnene Messergebnisse werden vorgestellt.

## 1 Einleitung

Das Hydrodynamische Prüffeld wird das nationale Primärnormal für die Darstellung und Messung der Größen Durchfluss sowie Volumen und Masse von strömenden Flüssigkeiten sein [1]. Es wird zur Untersuchung von Durchflussmessgeräten und zum Anschluss von Prüfständen bei Messgeräteherstellern und anderen anerkannten Prüfstellen eingesetzt werden. Um die geringe Standardmessunsicherheit von nur 0,01 % zu gewährleisten, sind in das Prüffeld zwei hydraulisch miteinander verbundene Normalmesseinrichtungen eingebaut. Durch direkte Vergleichsmessungen zwischen einer gravimetrisch (Wägesysteme mit Umschaltklappen [2]) und einer volumetrisch (Rohrprüfstrecke) arbeitenden Messeinrichtung wird es möglich sein, die Auswirkungen bisher kaum realistisch einschätzbarer Einflussgrößen auf die Messunsicherheit zu erkennen und wertmäßig zu erfassen, um letztendlich die hohen Anforderungen an die Gesamtanlage zu erfüllen.

Für die Normalmesseinrichtungen wurden von den Herstellern zwar Werte z. B. für die Messunsicherheit und Reproduzierbarkeit spezifiziert; um aber die geringe Standardmessunsicherheit des Prüffeldes auf Dauer sicher zu stellen, ist es zwingend notwendig, die Normalmesseinrichtungen zyklisch nachzukalibrieren. Zu diesem Zweck wurden die Wägesysteme im Prüffeld jeweils mit einer Belastungseinrichtung ausgestattet, die es jederzeit erlaubt, durch das Anhängen von kalibrierten Gewichtssätzen eine Nachkalibration der Waagen durchzuführen. Für die volumetrische Normalmesseinrichtung (Rohrprüfstrecke) wurden seitens der PTB zwei unterschiedliche Messverfahren für die Nachkalibration entwickelt. Beide Verfahren und erste Messergebnisse sollen hier vorgestellt werden. Bei dem einen Verfahren findet eine Rückführung auf ein Längennormal statt - hier wird das Messvolumen der Rohrprüfstrecke durch geometrisches Ausmessen bestimmt. Die technische Realisierung dieses Verfahrens, das die Nachkalibration vor Ort ermöglicht, ist weltweit neu und einzigartig. Bei dem anderen Verfahren findet eine Rückführung auf ein Massennormal statt - hier wird das Messvolumen durch das Wägen der verdrängten Wassermasse bestimmt.

## **2 Aufbau und Funktionsprinzip der Rohrprüfstrecke**

Als volumetrische Normalmesseinrichtung wurde ein sogenannter Compact Prover (Brooks Compact Prover 24“ BCP) in das Prüffeld eingebaut. Die Bestimmung des zu untersuchenden Durchflusses erfolgt über eine Weg-Zeit-Messung, wobei die einzelnen Funktionen der Rohrprüfstrecke von einer mitgelieferten Elektronik gesteuert und kontrolliert werden. Bild 1 zeigt eine schematische Darstellung der Rohrprüfstrecke/des Provers. Die Rohrprüfstrecke besteht aus einem Präzisionszylinder, in dem ein frei beweglicher Kolben mit einem Tellerventil eingebaut ist. Das Tellerventil ist zentrisch im Messkolben integriert und durch eine Stange mit dem Kolbenantriebszylinder verbunden. Im Antriebszylinder werden Drücke/Kräfte von dem Gas der pneumatischen Stickstoffvorlage und dem Öl der Hydraulik aufgebaut. Die von beiden Medien aufgebauten Kräfte wirken in die entgegengesetzte Richtung und erlauben somit die Ausführung verschiedener Funktionen. So liefert der Antriebszylinder den notwendigen Druck, um das Tellerventil zu öffnen bzw. zu schließen. Er

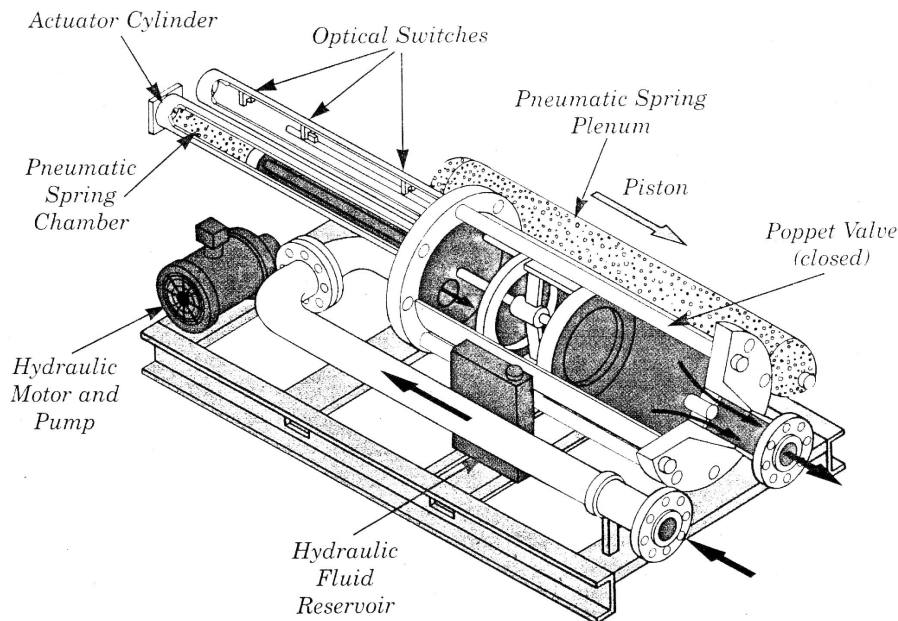


Bild 1: Schematische Darstellung der Rohrprüfstrecke

sorgt dafür, dass die Reibung der Radialdichtungen des Messkolbens überwunden wird. Außerdem wird über ihn der Messkolben nach jedem Messhub zurückgeholt.

Die Position des Kolbens wird über drei außerhalb vom Zylinder angeordnete optische Sensoren festgestellt, wobei die durch die Sensoren geführte Unterbrecherfahne starr über eine Stange mit dem Kolben verbunden ist. Befindet sich der Kolben in der Gegenstromposition, d. h. auf der Wassereintrittsseite, wird dies über den ersten Sensor wahrgenommen. Die Gegenstromposition ist auch gleichzeitig die Ausgangsposition für einen Messhub. Über die Position der beiden anderen Sensoren wird jeweils der Anfang und das Ende des Messvolumens definiert.

Die Gegenstromposition wird durch den von der Hydraulikpumpe aufgebauten Öldruck gehalten. In dieser Position ist das im Kolben befindliche Teller Ventil geöffnet, und das in den Zylinder strömende Wasser fließt nahezu ungehindert durch den Kolben. Zum Start eines Messhubes wird der Hydraulikdruck im Antriebszylinder über das Öffnen eines Magnetventils abgebaut und der Gasdruck schiebt das Teller Ventil in den Kolben. Der geschlossene Kolben wird jetzt durch das nachströmende Wasser stromabwärts beschleunigt. Im Anschluss an die Beschleunigungsphase, die nach wenigen Zentimetern endet, bewegt sich der Kolben mit konstanter Geschwindigkeit durch den Zylinder. Beim Erreichen des zweiten optischen Sensors wird die

Zeitmessung und die Registrierung der Anzeige des zu kalibrierenden Messgerätes gestartet und bei Erreichen des dritten Sensors gestoppt. Über die so gemessene Zeitspanne und das bekannte Messvolumen, das sich zwischen den beiden Sensoren befindet, wird letztendlich der Durchfluss in Volumen- pro Zeiteinheit bestimmt.

Befindet sich der Kolben hinter dem dritten Sensor, d. h. auf der Wasseraustrittsseite (Mitstromposition), wird das o. g. Magnetventil wieder geschlossen. Der sich im Antriebszylinder aufbauende Druck des Hydrauliköls öffnet nun das Tellerventil und zieht den Kolben in die Gegenstromposition zurück. Auf diese Weise wird während der sich kontinuierlich wiederholenden Messzyklen ein ununterbrochener Durchfluss gewährleistet.

Um die Wassertemperatur in der Rohrprüfstrecke messen zu können, wurden jeweils in das Wassereinströmröhr und in das Wasserausströmröhr ein Temperatursensor eingebaut. Zur Bestimmung der Zylindertemperatur wurden vier Temperaturfühler an seiner Außenfläche befestigt und die gesamte Außenfläche des Zylinders samt Fühler mit 2 cm starken Schaumstoffmatten wärmeisoliert verpackt. Weitere technische Daten zur Rohrprüfstrecke können Tabelle 1 entnommen werden.

Erweitert wurde der Funktionsumfang der Rohrprüfstrecke durch ein inkrementales Längenmesssystem zur kontinuierlichen Wegmessung des Messkolbens. Das Längenmesssystem (Haidenhain Typ LS406C) mit einer Messlänge von 1240 mm

Tabelle 1: Herstellerangaben zur Rohrprüfstrecke

Nenngröße	DN 600 (24“)
Volumenstrombereich	1,6 – 1600 m <sup>3</sup> /h
Messvolumen	ca. 250 l
Messrohrdurchmesser	ca. 647 mm
Messhublänge	ca. 759 mm
Messrohrlänge	ca. 1670 mm
Länge	4,543 m
Breite	1,991 m
Höhe	1,257 m
Gewicht	4535 kg

erlaubt zusammen mit der Positionsanzeige (Haidenhain Typ ND282) Anzeigeschritte von  $1\ \mu\text{m}$  bei einer Messunsicherheit von  $\pm 3\ \mu\text{m}$ . Die kontinuierliche Wegmessung soll zur Untersuchung der Kolbengleichlaufeigenschaften und zur hochpräzisen Vermessung des Zylinderinnendurchmessers zwecks Nachkalibration des Messvolumens eingesetzt werden.

### 3 Geometrisches Ausmessen des Messvolumens

Das geometrische Ausmessen des Messvolumens erfolgt über die Bestimmung der Zylinder-Innendurchmesserwerte mit Hilfe einer Messvorrichtung, die im „trockenen“ Prover an die Kolbenvorderseite befestigt wird. Über das inkrementale Längenmesssystem wird die Längsausdehnung des Messvolumens ermittelt. Bild 2 zeigt ein Foto der Messvorrichtung.

Die Vorrichtung besteht aus zwei über ein Drehgelenk miteinander verbundenen Armen aus Invar-Stahl, der sich durch einen sehr kleinen Wärmeausdehnungskoeffizient von  $\alpha = 1 \cdot 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$  auszeichnet. Der untere Arm dient als Träger und wird am Kolben befestigt. Im oberen Arm sind zwei inkrementale Messtaster (Haidenhain Spectro ST1201) und eine Verschiebeeinheit für Lagekorrekturen eingebaut. Über

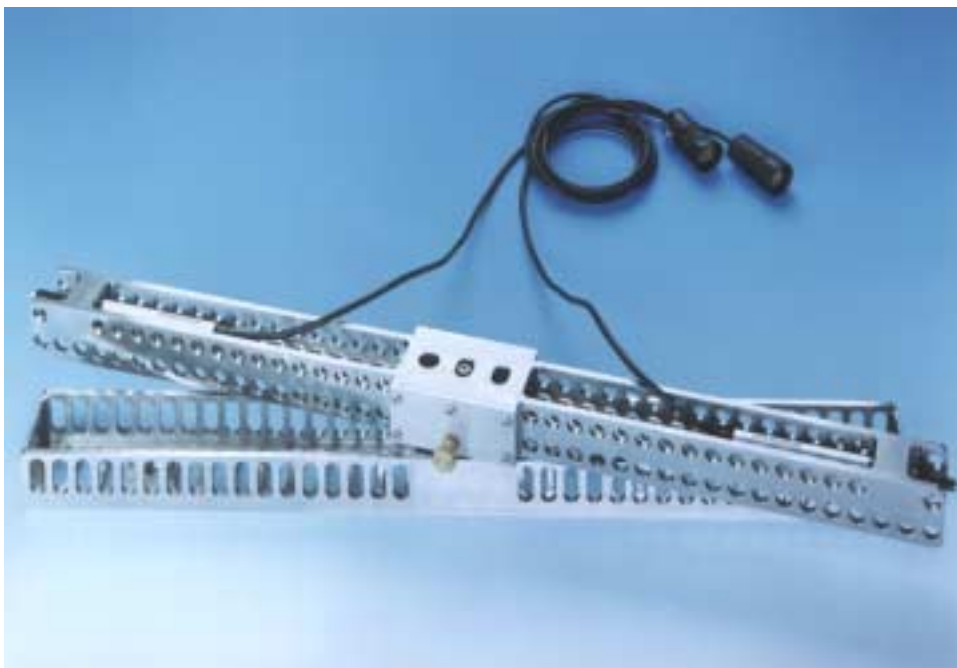


Bild 2: Foto der Vorrichtung zum geometrischen Ausmessen des Messvolumens

die Verschiebeeinheit kann sichergestellt werden, dass die Messvorrichtung den maximalen Durchmesser erfasst und nicht etwa den Abstand zweier Anlegepunkte auf der Zylinderinnenseite, die auf einer Sehne liegen. Die von den Messtastern gelieferten Messwerte werden über eine PC-Einsteckkarte (Haidenhain IK220 PC-Zählerkarte) in einen Rechner eingelesen. Laut Hersteller beträgt die Systemgenauigkeit  $\pm 1 \mu\text{m}$ . Die Vorrichtung ist 63 cm lang, wiegt ca. 5 kg und erlaubt eine Durchmesserbestimmung in 12 Winkelstellungen bei einer Rasterung von  $15^\circ$ .

Die Bedienungsfläche des Messwert-Erfassungsprogramms zeigt Bild 3. Dieser Bedienungsfläche sind die von den beiden Messtastern gelieferten Werte und ihr Summenwert, vom Längenmesssystem die Positionsangabe des Kolbens und ein Markerfeld für das Durchfahren der optischen Sensoren zu entnehmen. Außerdem kann über die Bedienungsfläche das Abspeichern sämtlicher Messwerte mit einem Datendurchsatz von 6 Datensätzen pro Sekunde gestartet und beendet werden. Die Reset-, Start- und Stop-Buttons werden für die Kalibrierung der Messvorrichtung benötigt.

Der Messablauf gestaltet sich wie folgt: die Messvorrichtung wird vor ihrem Einbau mittels eines Längennormals kalibriert. Das Normal, ebenfalls aus Invar-Stahl gefertigt, hat bei  $20^\circ\text{C}$  ein kalibriertes Innenmaß von  $646,9591 \text{ mm} \pm 7 \mu\text{m}$ . Nach dem Einlegen der Vorrichtung in das Normal werden die Messtaster-Anzeigewerte auf Null gesetzt, so dass während der Messung die Summenanzeige nur noch die Abweichungen von dem kalibrierten Innenmaß des Längennormals wiedergibt. Nach

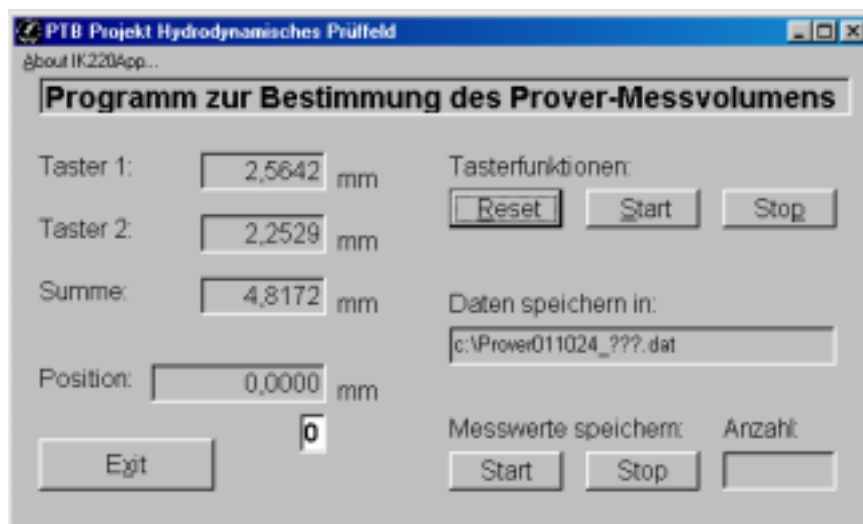


Bild 3: Bedienungsfläche des Messwerteerfassungsprogramms

dem Befestigen der Messvorrichtung an dem Kolben wird der bewegliche obere Messarm auf den maximalen Durchmesser justiert und anschließend fixiert. Mit Hilfe der Hydraulik und der Pneumatik wird dann der Kolben zusammen mit der angebauten Messvorrichtung langsam durch den Zylinder gefahren - von der Mitstromseite zur Gegenstromseite und wieder zurück - und die Werte für die Kolbenposition sowie die Werte für die Durchmesserbestimmung gespeichert. Befindet sich der Kolben wieder in der Mitstromposition lässt sich die Messung für eine geänderte Winkelstellung wiederholen.

Die mit der Messvorrichtung gemessenen Zylinder-Innendurchmesserwerte in Abhängigkeit von der Kolbenposition zeigt Bild 4. Dargestellt sind ca. 3200 Messwerte, die beim Verfahren des Kolbens von der Gegenstromposition (Kolbenposition: 0 mm) zur Mitstromposition (1087 mm) in 12 Winkelstellungen des oberen Tasterarmes aufgenommen wurden. Ebenfalls eingetragen ist die Längsausdehnung des

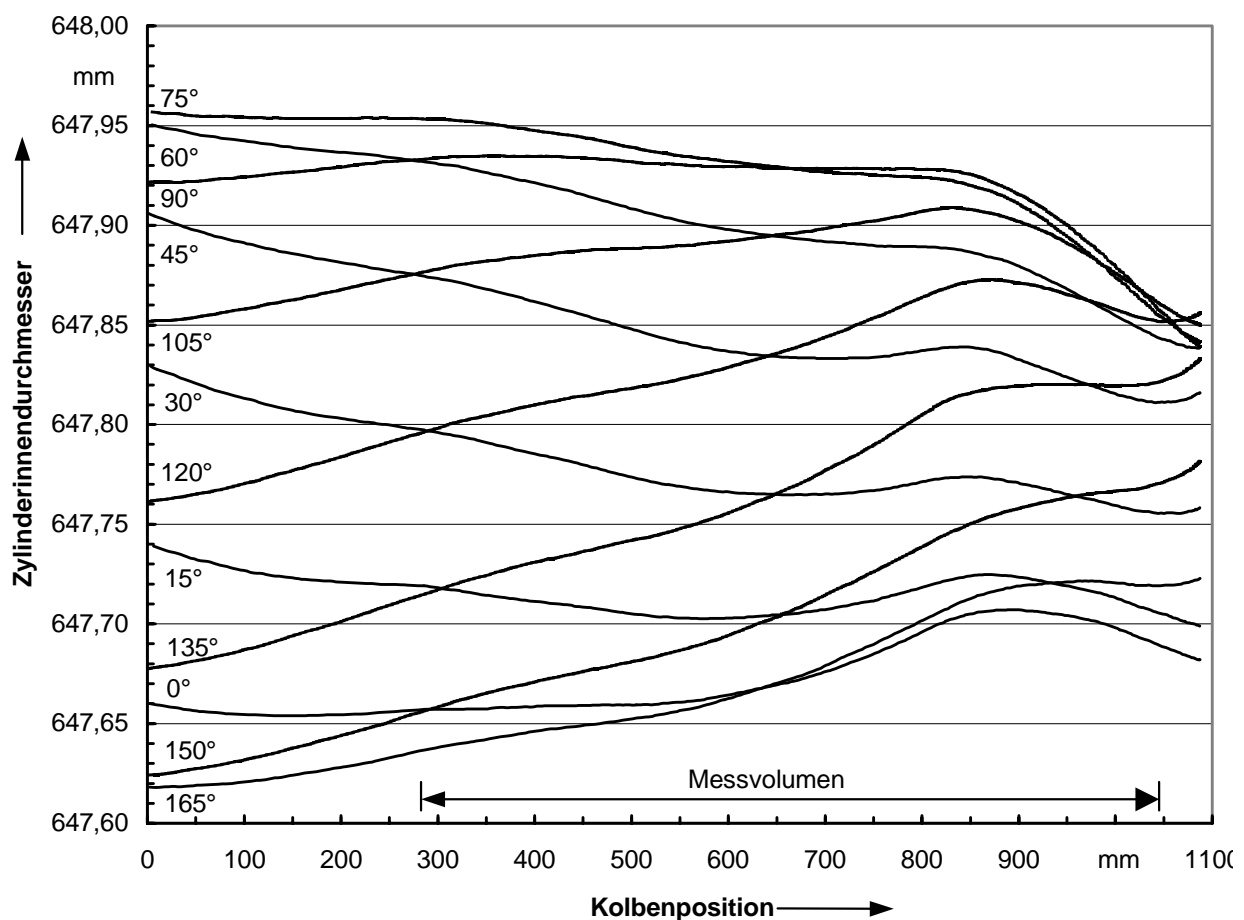


Bild 4: Gemessene Zylinderinnendurchmesser in Abhängigkeit von der Kolbenposition

Messvolumens. Durch wiederholtes, extrem langsames Verfahren des Kolbens wurden die Schaltpunkte der optischen Sensoren ermittelt, über die Anfang und Ende des Messvolumens definiert werden. Bei einer Schaltunsicherheit von  $\pm 7 \mu\text{m}$  ließ sich der Anfang bei einer Kolbenposition von 285,7875 mm und das Ende bei 1046,2960 mm bestimmen. Die Längsausdehnung des Messvolumens beträgt somit  $760,5085 \text{ mm} \pm 10 \mu\text{m}$ .

In allen Winkelstellungen lassen sich stetige Durchmesseränderungen in Zylinderlängsrichtung feststellen. Auffällig ist der Bereich zwischen 800 mm und 950 mm. Hier weisen alle Kurvenverläufe entweder ein lokales Maximum oder einen Wendepunkt auf. Die kleinsten Durchmesserwerte werden nahe der Horizontalen, um  $165^\circ$ , und die größten Werte nahe der Vertikalen, um  $75^\circ$ , gemessen. In der Gegenstromposition wurden die größten und die kleinsten Durchmesserwerte mit einer Schwankungsbreite von  $324 \mu\text{m}$  ermittelt. In der Mitstromposition beträgt diese Schwankungsbreite  $175 \mu\text{m}$ . Die größte Durchmesseränderung in Zylinderlängsrichtung wurde mit  $118 \mu\text{m}$  in der  $150^\circ$ -Winkelstellung gemessen und die kleinste mit  $22 \mu\text{m}$  in der  $15^\circ$ -Winkelstellung.

Bei der Kalibration der Messvorrichtung betrug die Temperatur der Vorrichtung und des Normals jeweils  $21,2^\circ\text{C}$ . Die Referenzlänge der Messvorrichtung hatte sich somit von  $646,5491 \text{ mm}$  um  $0,7 \mu\text{m}$  erhöht. Die Auswertung von 2717 Durchmesserwerten, die innerhalb der Messvolumenlänge bei einer Zylindertemperatur von  $20,9^\circ\text{C}$  gemessen worden sind, ergab einen gemittelten Zylinder-Innendurchmesserwert von  $647,8046 \text{ m}$ . Bezogen auf eine Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  errechnet sich das durch das geometrische Verfahren ermittelte Messvolumen zu  $250,6529 \text{ dm}^3$ .

Aus der Betrachtung aller in Bild 4 aufgeführten Kurvenverläufe lässt sich erkennen, dass der Zylinder eine leicht ovale Form besitzt. In der Darstellung von Bild 5 wird dieses nochmals deutlich. Aufgetragen sind hier in einem Polarkoordinatendiagramm die gemessenen Zylinder-Innendurchmesserwerte in Abhängigkeit von den 12 Winkelstellungen bei vier Kolbenpositionen (0 mm, 400 mm, 800 mm und 1087 mm). Um eine bessere Auflösung für die Betrachtung zu erhalten, wurde die radiale Komponente der Darstellung auf  $600 \mu\text{m}$  begrenzt. Ausgehend von einem Durchmesserwert von  $647,4 \text{ mm}$ , der sich im Zentrum des Diagramms befindet,

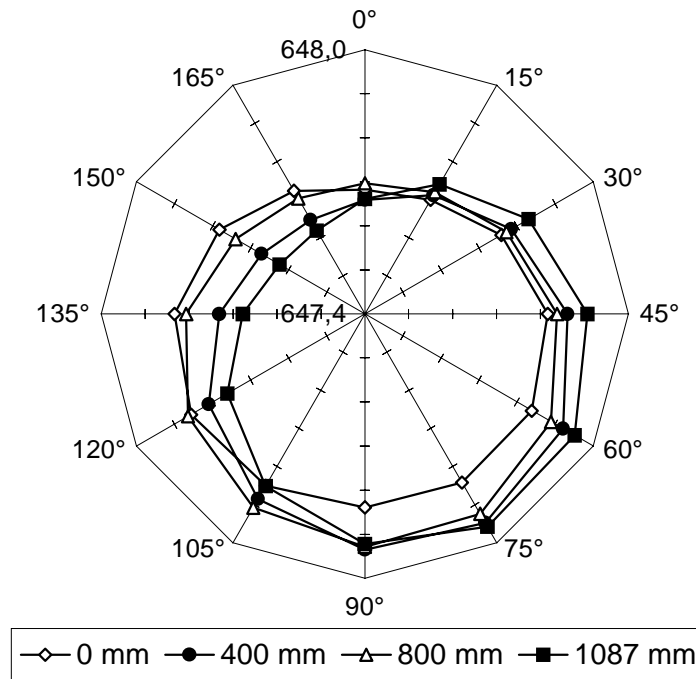


Bild 5: Ovalität des Zylinders an unterschiedlichen Kolbenpositionen

werden größere Zylinder-Innendurchmesserwerte vom Zentrum entfernt aufgetragen. Der Randbereich des Polarkoordinatendiagramms spiegelt Werte von 648,0 mm wider.

Diese Darstellung zeigt, dass der Zylinder nicht nur eine leicht ovale Form besitzt, sondern, dass sich die Ovalität in Zylinderlängsrichtung in der Größe sowie in der Lage seiner Achsen verändert. Die Ursache für diese Formgebung könnten Verspannungen im Zylinder sein, die nach dem Einklemmen des Zylinders zwischen

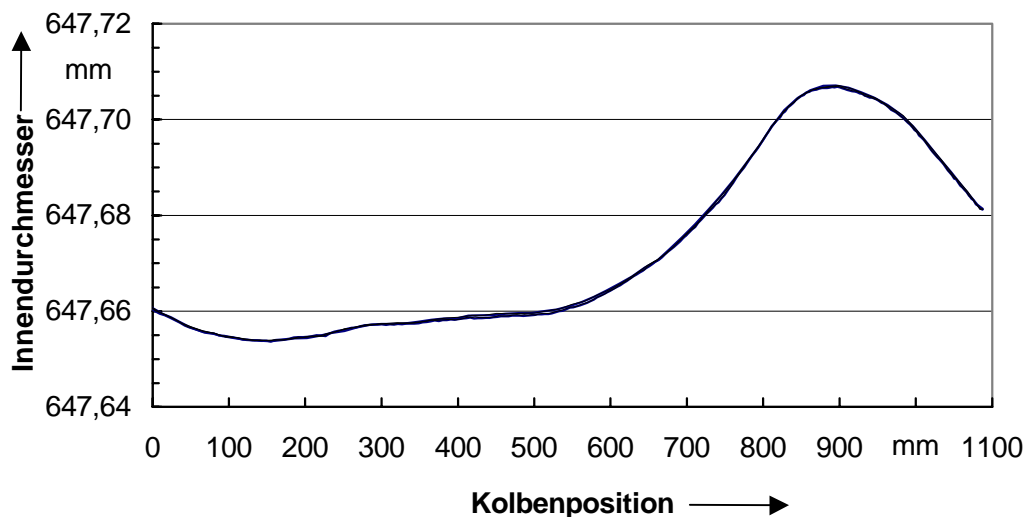


Bild 6: Vierfache Wiederholung der Messung in der horizontalen Ausdehnung (0°)

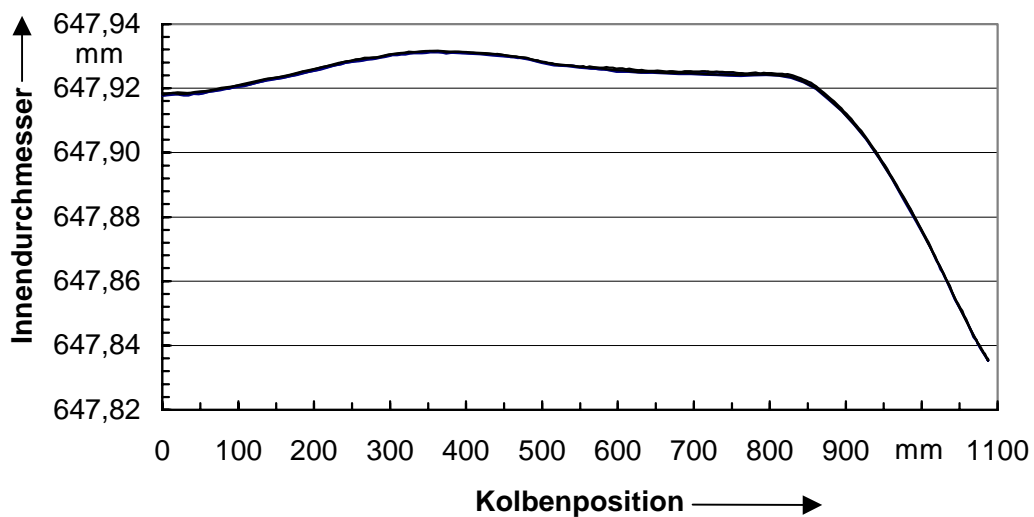


Bild 7: Vierfache Wiederholung der Messung in der vertikalen Ausdehnung (90°)

den beiden Zylinderstirnplatten über außenliegende Gewindestangen entstanden sind. Laut Herstellerangaben wurde die Unzylindrizität des nicht eingespannten Zylinders mit kleiner als 100  $\mu\text{m}$  spezifiziert. Dieses Messverfahren, das sowohl in radialer (Messtaster; unterschiedliche Winkelstellungen) als auch in axialer Richtung (inkrementales Längenmesssystem) eine räumlich hochaufgelöste geometrische Ausmessung des Zylinders gestattet, bietet noch weitere Ansätze zur Charakterisierung des Messvolumens. So ist z. B. beabsichtigt, im Rahmen von nachfolgenden Untersuchungen das Messvolumen über eine „scheibchenweise“ Bestimmung mit Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Ovalität zu ermitteln.

Die Reproduzierbarkeit der mit der hier vorgestellten Messvorrichtung gewonnenen Messwerte verdeutlichen Bild 6 und Bild 7. Dargestellt sind hier jeweils vier Kurvenverläufe für die horizontale (0°) und für die vertikale (90°) Ausdehnung des Zylinders. Es wurde jeweils zweimal von der Mitstrom- zur Gegenstromposition und wieder zurück gemessen. Die größte in den Bildern 6 und 7 dargestellte Streuung beträgt 1  $\mu\text{m}$ . Bei der Auswertung aller Messkurven (0° - 165°; Kolbenbewegung: von der Mitstrom- zur Gegenstromposition und wieder zurück) wurde eine maximale Differenz von 2  $\mu\text{m}$  festgestellt. Die gute Reproduzierbarkeit des hier vorgestellten neuartigen Messverfahrens scheint somit gewährleistet zu sein, sie muss aber durch weitere Untersuchungen bestätigt und zahlenmäßig erfasst werden.

#### 4 Gravimetrisches Ausmessen des Messvolumens

Das zweite Verfahren für die Kalibrierung des Messvolumens basiert auf der Rückführung auf ein Massennormal. Die vom Kolben verdrängte innerhalb des Messvolumens befindliche Wassermasse wird hierbei mittels einer Waage bestimmt, die jederzeit durch das Aufsetzen von kalibrierten Gewichtssätzen nachkalibriert werden kann. Eine schematische Darstellung der Messanlage zeigt Bild 8. Oberhalb der Rohrprüfstrecke befindet sich ein Vorratsbehälter für 1500 l Wasser. Um ein Ausgasen des Wassers zu ermöglichen, werden der Behälter und die Rohrprüfstrecke 2-3 Tage vor der Aufnahme einer Messreihe mit Wasser gefüllt.

Über zwei DN50-Leitungen mit den geöffneten Ventilen V1 und V4 ist die Rohrprüfstrecke auf der Gegen- und der Mitstromseite mit dem Tank verbunden. Die Entlüftung der Rohrprüfstrecke erfolgt über zwei DN25-Leitungen, die an beiden Stirnseiten jeweils am höchsten Punkt angebracht sind. Die Ventile V2 und V3 sind während der Entlüftung zu öffnen. Die aus der Rohrprüfstrecke stammende und in den 150 l-Wägebehälter der Waage gefüllte Wassermasse wird über das geöffnete Ventil V5 zu einem Rohrbogen mit eingebautem Bypass geführt, so dass ein definierter Übergabepunkt (Überlauf) für die Messung gewährleistet ist, siehe auch Bild 9. Da die Waage (Auflösung: 1 g) mit maximal 100 kg nachkalibriert werden

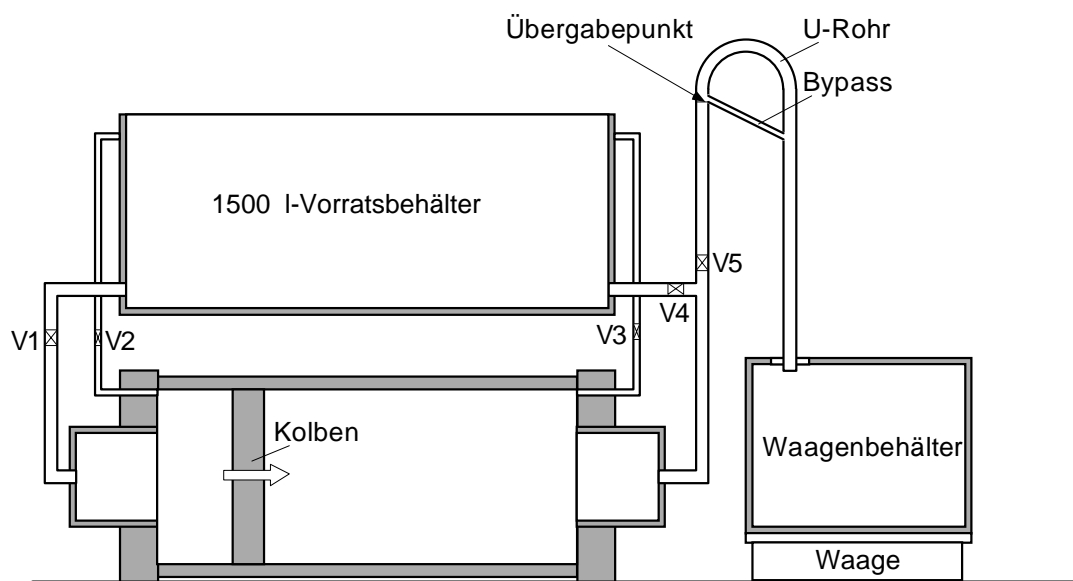


Bild 8: Schematische Darstellung der Messanordnung für die gravimetrische Bestimmung des Messvolumens

kann, das aus dem Messvolumen stammende Wasser aber eine Masse von ca. 250 kg aufweist, wird eine Messung mit drei aufeinanderfolgenden Teilhüben durchgeführt.

Der Messablauf gestaltet sich wie folgt: um letzte Gasblasen aus dem Zylinder zu entfernen und um eine homogene Temperaturverteilung im Wasser zu erhalten, wird vor einer Messung der Kolben der Rohrprüfstrecke mehrmals hin und her gefahren. Sämtliche Ventile sind hierbei geöffnet. Anschließend werden die Ventile V3 und V4 geschlossen und der Kolben in den Bereich des Messvolumenansfangs gefahren. Die absolute Kolbenposition wird - wie auch bei jedem Halt des Kolbens - durch das inkrementale Längenmesssystem wiedergegeben. Nachdem sich am Übergabepunkt vor dem Rohrbogen eine beruhigte Wasseroberfläche eingestellt hat, wird der Wägebekälter leergepumpt, die Waagenanzeige auf Null gesetzt und die Messung



Bild 9: Teilausschnitt der Messanlage für die gravimetrische Bestimmung des Messvolumens; v. li. n. re.: 1500 l-Tank, U-Rohr mit Bypass, Wägebekälter

mit dem ersten Teilhub gestartet. Über die Pneumatik wird der Kolben mit geringer Geschwindigkeit wieder vorwärts bewegt und nach ungefähr einem Drittel der Messvolumenlänge gestoppt. Nach dem Ablesen des Wägewertes wird dann wieder der Behälter geleert und die Anzeige auf Null gesetzt. Gleiches wiederholt sich für den zweiten und dritten Hub. Der dritte Hub endet im Bereich des Messvolumenendes. Anschließend wird die Summe der Teilmassen auf die absolute Messvolumenlänge umgerechnet, die Messvolumenmasse bzgl. des Luftauftriebs korrigiert [3], über die gemittelte Temperatur des Wassers ihre Dichte bestimmt und das Messvolumen in  $\text{dm}^3$  berechnet.

Für die erste Überprüfung des hier vorgestellten Messverfahrens wurden insgesamt 7 Messungen an 2 Tagen (Tag 1: Messung 1-3, Tag 2: Messung 4-7) durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 dargestellt. Aufgelistet sind die aufsummierte Masse der Teilhübe  $m_{\text{Wasser}}$  in kg, die aufsummierte Länge der Teilhübe  $L_{\text{Mess}}$  in mm, die auf die absolute Messvolumenlänge (760,5085 mm) umgerechnete Masse  $m_{\text{Messvol}}$  in kg, die unter Berücksichtigung des Luftauftriebs korrigierte Masse  $m_{\text{Messvol,korr.}}$  in kg, die gemittelte Wassertemperatur  $T_{\text{Wasser}}$  in  $^{\circ}\text{C}$ , die gemessene Dichte des Wassers  $\rho_{\text{Wasser}}$  in  $\text{g}/\text{cm}^3$  und das aus der Dichte  $\rho_{\text{Wasser}}$  und der korrigierte Messvolumenmasse  $m_{\text{Messvol,korr.}}$  berechnete Messvolumen  $V_{\text{Messvol}}$  in  $\text{dm}^3$ .

Die Auswertung der 7 Einzelmessungen ergab für das Messvolumen einen gemittelten Wert von  $250,6340 \text{ dm}^3$  bei einer Standardabweichung von  $0,0158 \text{ dm}^3$  (relativer Wert:  $6,3 \cdot 10^{-5}$ ). Im Vergleich zum Ergebnis der geometrischen Ausmessung ( $250,6529 \text{ dm}^3$ ) entspricht dies einer Abweichung von  $0,0075 \%$ . Im Rahmen von

Tabelle 2: Auswertung der gravimetrischen Bestimmung des Messvolumens

Messung	1	2	3	4	5	6	7
$m_{\text{Wasser}}/\text{kg}$	250,2055	250,1925	249,8176	249,1560	247,0244	252,1035	249,7800
$L_{\text{Mess}}/\text{mm}$	761,1305	761,1930	759,9850	757,9280	751,4295	766,8760	759,841
$m_{\text{Messvol}}/\text{kg}$	250,0010	249,9675	249,9896	250,0042	250,0090	250,0102	249,9994
$m_{\text{Messvol,korr.}}/\text{kg}$	250,2662	250,2327	250,2548	250,2694	250,2742	250,2754	250,2646
$T_{\text{Wasser}}/^{\circ}\text{C}$	21,341	21,360	21,989	20,772	20,789	20,805	20,837
$\rho_{\text{Wasser}}/\text{g}/\text{cm}^3$	0,998427	0,998423	0,998416	0,998589	0,998589	0,998589	0,998589
$V_{\text{Messvol}}/\text{dm}^3$	250,6605	250,6279	250,6518	250,6229	250,6277	250,6289	250,6181

zeitintensiven Reihenuntersuchungen mit unterschiedlichen Auswertemethoden sind beide Messverfahren weiterhin messtechnisch zu verifizieren sowie durch das Aufstellen von Messunsicherheits-Budgets grundlegend zu charakterisieren.

## **5 Zusammenfassung**

Um die geringe Standardmessunsicherheit des Hydrodynamischen Prüffeldes auf Dauer sicherstellen zu können, sind die in das Prüffeld eingebauten Normalmesseinrichtungen (Wägesysteme/Rohrprüfstrecke) zyklisch nachzukalibrieren. Für die Kalibration der Rohrprüfstrecke wurden zwei Messverfahren entwickelt und hier vorgestellt. Bei dem einen Verfahren wird das Messvolumen der Rohrprüfstrecke gravimetrisch und bei dem anderen, einem weltweit neuartigen Verfahren, geometrisch bestimmt. Eine erste Untersuchung und Erprobung beider Verfahren lieferte für das Messvolumen der Rohrprüfstrecke Werte, die sich lediglich um 0,0075 % unterschieden. Diesem vielversprechenden, ersten Ergebnis werden weitere Untersuchungen folgen, um für beide Verfahren Aussagen zur Messunsicherheitsanalyse, zur Reproduzierbarkeit und zur Langzeitstabilität quantifizieren zu können.

## **6 Literatur**

- [1] W. Pöschel, R. Engel: The concept of a new primary standard for liquid flow measurement at PTB Braunschweig. The 9th Int. Conf. on Flow Measurement FLOMEKO 1998, Lund, Sweden, June 15-17, 1998
- [2] W. Pöschel, R. Engel, D. Dopheide, H.J. Baade, H.J. Kecke, R. Praetor, N. Weist, E. Kurras: A unique fluid diverter design for water flow calibration facilities. The 10th Int. Conf. on Flow Measurement FLOMEKO 2000, Salvador, Brazil, June 5-8, 2000
- [3] F. Kohlrausch: Praktische Physik, Band 1, B.G. Teubner Verlag Stuttgart, 23. Auflage, 1985, S. 69 f.