	Validierung von Kalibrier-Prüfständen	<ul style="list-style-type: none"> ➤ PTB – FB Wärme (D) ➤ PTB – FB Flüssigkeiten (D) ➤ METAS – FB Durchfluss (CH) ➤ BEV – FB Durchfluss (A) ➤ OPTOLUTION GmbH (CH) ➤ ILA GmbH (D)
-----------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**„Richtlinie zur strömungstechnischen Validierung von Kalibrier-Prüfständen
im Rahmen der EN 1434“
- Deutschland, Oktober 2009 -**

Gliederung:

1. Zielsetzung und Vorgehensweise
 2. Anforderungen an die Validierung
 - 2.1. Messverfahren
 - 2.2. Messbedingungen
 - 2.3. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse
 - 2.4. Akzeptanz der Messergebnisse
 3. Kennzahlen
 - 3.1. Einführung
 - 3.2. Axiale Geschwindigkeitskomponente (w)
 - 3.3. Tangentiale Geschwindigkeitskomponente (u)
- Literaturverzeichnis
Anlage

1. Zielsetzung und Vorgehensweise

- Die aktuelle Norm EN 1434-2006 [EN1434] enthält erstmalig Anforderungen zur Strömungscharakteristik von Prüfständen zur Kalibrierung von Durchfluss-Sensoren (DFS) von Wärmezählern.
- Im Teil 4, Kapitel 6.22 werden für die zur Kalibrierung der DFS verwendeten Prüfstände ungestörte und vollausgebildete Strömungszustände, d. h. rotationsymmetrische und drallfreie Geschwindigkeitsverteilungen gefordert.
- Ferner wird die Untersuchung der Durchfluss-Sensoren (DFS) hinsichtlich ihrer messtechnischen Verhalten bei gestörten Strömungsverhältnissen („Durchflussstörungen“) innerhalb der Bauartzulassung bzw. des Konformitätsbewertungsverfahrens vorgeschrieben.
- Die vorliegende Richtlinie dient als Anleitung zum messtechnischen Nachweis der erstgenannten Forderung (Validierung) und der generellen Beurteilung von Geschwindigkeitsverteilungen in Rohrleitungen von Kalibrier-Prüfständen.
- Nach der messtechnischen Erfassung der Strömungsverhältnisse werden diese mittels geeigneter Kennzahlen beschrieben und quantifiziert, anschliessend werden die ermittelten Werte der Kennzahlen mit vorgegebenen Orientierungskriterien zur Beschreibung von praktisch hinreichend ausgebildeten Strömungsverhältnissen verglichen.
- Wird der Nachweis der geforderten Strömungsverhältnisse anhand dieser Richtlinie durchgeführt, werden die Systematik und der Umfang der Messungen sowie die Dokumentation der Ergebnisse in dem Bericht durch die nationalen Metrologieinstitute Deutschlands, der Schweiz und Österreichs sowie andere Benannte Stellen akzeptiert.
- Die Erfüllung des Nachweises bleibt von den jeweiligen Messergebnissen und deren Beurteilung durch die jeweilige Benannte Stelle abhängig.

2. Anforderungen an die Validierung

2.1 Messverfahren

- Zur Erfassung der Strömungszustände sind vorzugsweise berührungslose Messverfahren einzusetzen.
- Es wird der Einsatz von optischen Messverfahren empfohlen.
- Favorisiert wird die Verwendung der berührungslosen Laser Doppler Velocimetry (LDV), da sie mit vertretbarem Geräte- und Zeitaufwand zu sehr aussagefähigen Ergebnissen bei geringer Messunsicherheit führt.

2.2 Messbedingungen

a) Betroffene Prüfstände:

- Es wird unterschieden zwischen Prüfständen zur ausschliesslichen Kalibrierung von DFS in der Produktion (Produktions-Prüfstände) und Prüfständen zur Durchführung von Prüfungen für Konformitätsbewertungen und im Rahmen von Entwicklungen (Zulassungs-Prüfstände).

- Die Umsetzung der Richtlinie ist in Deutschland bindend für alle Zulassungs-Prüfstände von DFS, die für Prüfungen im Rahmen von Konformitätsbewertungs/Akkreditierungs-Verfahren bei den unterschiedlichen Betreibern von Prüfständen eingesetzt werden.
- Die Umsetzung der Richtlinie wird in Deutschland empfohlen für alle Produktions-Prüfstände, die von den unterschiedlichen Betreibern zur Kalibrierung von DFS eingesetzt werden.
- Betreiber von Prüfständen sind z. B. Hersteller von DFS, Fernwärme-Versorgungsunternehmen, unabhängige Prüf- und Reparaturstellen sowie Behörden.
- Die nationalen Metrologie-Institute bzw. die Benannten Stellen legen für jeden Prüfstandsbetreiber individuell fest, für welche Prüfstände der Nachweis zu erbringen ist. Kriterien für diese Auswahl sind z. B. die auf den jeweiligen Prüfständen zu kalibrierenden Bauarten und Mengengerüste von DFS, die Betriebsbedingungen an den Prüfständen und die hydraulische Komplexität der Prüfstände (speziell der Strömungsantriebe).

b) Zeitpunkt und Periodizität für den Nachweis:

- Der Nachweis ist Bestandteil des Konformitätsbewertungs-Verfahrens.
- Eine Aktualisierung des Nachweises ist bei jeder baulichen Veränderung, die die Strömungsverhältnisse in der Prüfstrecke betreffen (z. B. Modifizierungen der Zuströmung, des Strömungsantriebs oder der Einspann-Vorrichtungen), notwendig.
- Eine Wiederholung des Nachweises ist entsprechend der Kriterien für die Konformitätsbewertungs-Verfahren durchzuführen.

c) Parameter für die Messungen:

- Messgrößen:
 - * Zu messende Größen sind die axialen Geschwindigkeiten und die zugehörigen Turbulenzgrad der Hauptströmung.
 - * Zusätzlich ist die tangentielle Geschwindigkeit als Mass für den Drall in der Strömung oder die gesamte Sekundärströmung zu erfassen.
 - * Empfehlungen:
 - Während der Messungen sollten zusätzlich der vom Gebrauchsnorm gemessene Volumenstrom und die Fluidtemperatur mit einer zeitlichen Auflösung von mindestens 60 Sekunden aufgezeichnet werden.
 - Zusätzlich sollte die Konstanz der Volumenströme durch LDV-Messungen an einem ausgewählten Punkt im Strömungsquerschnitt (z. B in Rohrmitte) über eine Mindestzeitdauer von 60 Minuten kontrolliert werden.
- Messort:
 - * Die Messungen sind am Ort des ersten DFS in der Prüfstrecke bei den jeweiligen Prüfungen unabhängig vom Einsatzzweck des Prüfstandes zu Einzel- oder Serienprüfungen durchzuführen.
 - * Bei unzureichend ausgebildeten Strömungsverhältnissen am Messort ist die Position des ersten DFS zu verschieben und/oder es sind Baugruppen zur Strömungskonditionierung der Prüfstrecke vorzuschalten.
- Rohrdurchmesser am Messort:
 - * Der Rohrdurchmesser am Messort muss dem Original-Durchmesser des in die Prüfstrecke führenden Rohres (d. h. ohne Reduzierungen oder Erweiterungen!) entsprechen bzw. des Durchmessers des Rohres der Einspannvorrichtung oder der strömungskonditionierenden Baugruppe.
 - * Sind die Rohrdurchmesser der auf dem Prüfstand zu kalibrierenden DFS kleiner als die Original-Nennweite des in die Prüfstrecke führenden Rohres, so ist der Rohrdurchmesser am Messort entsprechend des Rohrdurchmessers der grössten auf dem Prüfstand zu kalibrierenden DFS zu wählen.
 - * Alternativ sind individuelle Festlegungen der nationalen Metrologie-Institute bzw. Benannten Stellen möglich.
- Anforderungen an die Messstrecke:
 - * Zur Vermeidung von zusätzlichen Turbulenzen sind absatzarme und lückenlose Übergänge zwischen dem Rohr der Prüfstrecke und dem Rohr am Messort sicherzustellen. Der maximale Versatz zwischen den beiden Rohren darf fünf Prozent bezogen auf den Innendurchmesser des Rohres der Prüfstrecke nicht übersteigen.

- Prüfpunkte:
 - * Als Prüfpunkte sind die Volumenströme q_i , $0,1 \cdot q_p$ und q_p entsprechend der gewählten Rohr-Nennweite und dem grössten Dynamikbereich der zu kalibrierenden DFS zu wählen.
 - * Für den Nachweis des Dralls sind nur Messungen am Prüfpunkt q_p notwendig.
 - * Die Fluid-Temperatur muss der bei der Kalibrierung verwendeten Temperatur entsprechen ($15 \pm 5 \text{ °C}$ oder $50 \pm 5 \text{ °C}$ oder $85 \pm 5 \text{ °C}$).
 - * Zur Vermeidung von zusätzlichen Effekten durch Temperaturschichtungen sind die Messungen für den laminaren Strömungszustand bei einer maximalen Fluidtemperatur von $20 \pm 5 \text{ °C}$ durchzuführen.
 - * Der Wasserdruck ist entsprechend den Betriebsbedingungen des Prüfstandes zu wählen.
- Weitere Prüfbedingungen:
 - * Bei wählbarem Strömungsantrieb für den Prüfstand (z. B. durch Hochbehälter oder mittels Pumpen) ist Pumpenbetrieb zu wählen.
 - * Falls Einbauten in der Vorlaufstrecke (wie z. B. in die Strömung hineinragende Temperaturfühler) unter Betriebsbedingungen existieren, sind die Messungen mit diesen durchzuführen – die Messungen sind zu vergleichen mit zusätzlichen Messungen für den Prüfpunkt q_p bei entfernten Einbauten.
 - * Befindet sich vor der Prüfstrecke ein 90° -Krümmer in der Zuleitung, so muss die Messebene für die Messung des Drallprofils vorzugsweise rechtwinklig zur Krümmungsebene angeordnet werden, maximal ist eine Abweichung von $\pm 45^\circ$ zur Krümmungsebene zulässig.

d) Auflösung und Messunsicherheit

- Anzahl Messpunkte über den Strömungsquerschnitt:
 - * Messung der axialen Geschwindigkeiten:
 - ◆ Es sind mindestens zehn gleichmässig über den gesamten Rohrquerschnitt verteilte Profile (d. h. maximaler Winkelabstand von 18°) entlang der Durchmesser-Ebenen mit jeweils mindestens 20 Messpunkten aufzunehmen.
 - ◆ Die Profile sollten Messpunkte in der Rohrmitte ($r/R = 0$) und in der Nähe des repräsentativen Wandabstandes, bei dem die lokale Geschwindigkeit der volumetrischen Geschwindigkeit entspricht, beinhalten.
 - ◆ Für laminare Strömungsverhältnisse befindet sich dieser Ort bei $r/R = 0,707$, beim turbulenten Strömungszustand wird vereinfacht der AICHELEN-Punkt bei $r/R = 0,762$ empfohlen.
 - * Messung der tangentialen Geschwindigkeit:
 - ◆ Es ist mindestens ein Profil mit mehr als 20 Messpunkten entlang einer Durchmesser-Ebene zu erfassen.
- Messunsicherheit:
 - * Es ist eine maximale Messunsicherheit von 5 % (entspricht doppelter Standardabweichung) für die Bestimmung der lokalen Geschwindigkeiten (inkl. der Unsicherheit für die Bestimmung des Messortes) zu gewährleisten.

2.3 Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

- Der bei der Benannten Stelle einzureichende Bericht muss folgende Kapitel bzw. Informationen beinhalten:
 - Kurzbeschreibung des Prüfstandes bzw. Beifügung einer entsprechenden Dokumentation als Anlage
 - Dokumentation der Installationsverhältnisse (ein- und auslaufseitig) am Prüfstand
 - Beschreibung der eingesetzten Messtechnik und des Messaufbaus zur Strömungsdiagnostik
 - Erläuterung der Versuchssystematik (Messregime und Messbedingungen)
 - Grafische Darstellung der Messergebnisse
 - Berechnung der Kennzahlen (vgl. Kapitel 3 und Anlage 1)
 - Zusammenfassung.

2.4 Akzeptanz der Messergebnisse

- Die Beurteilung der Strömungsverhältnisse auf ihre Zulässigkeit erfolgt individuell durch die Benannten Stellen bzw. die nationalen Metrologie-Institute.
- Die Quantifizierung und der Vergleich der Messergebnisse erfolgt mit den Kennzahlen Profilmfaktor, Asymmetriefaktor, Turbulenzfaktor und maximaler Drallwinkel.
- Zur Orientierung der Zulässigkeit gelten folgende Bereichsgrenzen bzw. Maximalwerte für die Kennzahlen:

○ Profilmfaktor K_p :	Bereich	$0,8 \leq K_p \leq 1,3$
○ Asymmetriefaktor K_a in %:	maximaler Wert	$K_{a,max} = 1 \%$
○ Turbulenzfaktor K_{tu} :	maximaler Wert	$K_{tu,max} = 2$
○ Drallwinkel in Grad:	maximaler Wert	$\Phi_{max} = 2^\circ$

- Auch bei Einhaltung der o. g. Orientierungskriterien trifft die jeweilige Benannte Stelle die letztendliche Entscheidung, ob der Nachweis für die geforderten ungestörten und vollausgebildeten Strömungszustände erbracht ist.

3. Kennzahlen

3.1 Einführung

- Die Beurteilung der Rohrströmung erfolgt mittels Kennzahlen, die einen schnellen und einfachen Rückschluss auf die Strömung zulassen, die auch für den Praktiker zu handhaben sind und die, wenn möglich, auch bereits für ähnliche Anwendungen Verwendung finden.
- YEH und MATTINGLY [Yeh94, Yeh95] haben derartige Kennzahlen in Zusammenhang mit der Untersuchung von Installationseffekten auf verschiedene Volumenstrom-Messgeräte mittels LDV definiert, die die Grundlage für die folgenden Ausführungen bilden.
- Generell werden danach drei Gruppen von Kennzahlen unterschieden [Mick95]:
 - Kennzahlen, die aus punktuell gemessenen Geschwindigkeitswerten ermittelt werden
 - Formparameter, die auf einer Integration von Differenzen des Geschwindigkeitsprofils beruhen, bezogen auf eine punktuell ermittelte Geschwindigkeit oder einer charakteristische Geschwindigkeit oder
 - Kennzahlen, die die Verteilung der Geschwindigkeit in allgemeiner Form

$$K = \iint \bar{w} \cdot \bar{v} \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi$$

mit $w \dots$ axiale Geschwindigkeit

$v \dots$ tangentielle Geschwindigkeit

als ein integrales Mass beschreiben, welches je nach Wahl der Exponenten unterschiedliche physikalische Bedeutung besitzt.

- Im konkreten Fall sollte, soweit sinnvoll, auf Grund der heutigen Möglichkeiten der LDV-Messtechnik mit Kennzahlen der zweiten und dritten Gruppe gearbeitet werden.
- Die Kennzahlen sind möglichst auf den vollaussgebildeten Strömungszustand zu beziehen.
- Für die Festlegung von hinreichend ausgebildeten Strömungszuständen sind Toleranzbereiche zu definieren, die wiederum möglichst Bezug zu bereits vorhandenen Empfehlungen haben sollten und die auf die praktischen Gegebenheiten auf Kalibrier-Prüfständen Rücksicht nehmen (z. B. keine „Laborströmungen“).

3.2. Axiale Geschwindigkeitskomponente (w)

- Zu beurteilen sind:
 - die Profilform, d. h. eine Abplattung, Einsattelung oder „Anspitzung“ gegenüber der vollständig ausgebildeten Strömung => Profilmfaktor
 - die Asymmetrie der Geschwindigkeitsverteilung, d. h. z. B. eine Verlagerung des Schwerpunktes aus der Rotationssymmetrie-Ebene => Asymmetriefaktor und
 - der maximale Turbulenzgrad in einem bestimmten Bereich (z. B. Kernbereich) der Strömung als Mass für die Schwankungsgeschwindigkeit bzw. „Unruhe“ in der Strömung => Turbulenzfaktor.

a) Profilmfaktor

- Die Definition erfolgt in Anlehnung an die Festlegung von P_5 nach [Yeh94]:

$$K_p = \frac{K_{p,mess}}{K_{p,s}}$$

mit $K_p \dots$ Profilmfaktor

$K_{p,mess} \dots$ Profilmzahl des gemessenen Profils

$K_{p,s} \dots$ Profilmzahl des Normprofils

$$K_{p,mess} = \frac{\int (w_m - w) \cdot dr}{w_{vol} \cdot D} = \frac{1}{2 \cdot w_{vol}} \int_{-1}^1 (w_m - w) \cdot d\left(\frac{r}{R}\right)$$

$$K_{p,s} = \frac{\int (w_{s,m} - w_s) \cdot dr}{w_{vol} \cdot D} = \frac{1}{2 \cdot w_{vol}} \int_{-1}^1 (w_{s,m} - w_s) \cdot d\left(\frac{r}{R}\right)$$

mit w_m ... gemessene Geschwindigkeit in Rohrmitte ($r/R = 0$)
 w ... gemessene örtliche Geschwindigkeit bei r/R
 w_{vol} ... volumetrische Geschwindigkeit $w_{vol} = Q/(\pi \cdot R^2)$
 R ... Rohrradius
 r ... lokale Messposition
 w_s ... örtliche Geschwindigkeit des Normprofils
 $w_{s,m}$... Geschwindigkeit in Rohrmitte ($r/R = 0$) des Normprofils

- Der Profilfaktor K_p ist ein Mass für die Zuspitzung ($K_p > 1$) bzw. Abflachung ($K_p < 1$) des gemessenen Profils im Vergleich zum Normprofil.
- Die Profilzahl des gemessenen Profils $K_{p, mess}$ ist zu normieren auf die vollausbildete laminare oder turbulente Geschwindigkeitsverteilung ($K_{p,s}$).
- Bei einer vollausbildeten Strömung beträgt der Wert des Profilfaktors somit „1“.
- Die vollausbildete laminare Strömung (laminares Normprofil) kann durch das Gesetz von HAGEN-POISEUILLE beschrieben werden (vgl. Abbildung 1):

$$\frac{w(r/R)}{w_{vol}} = 2 \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

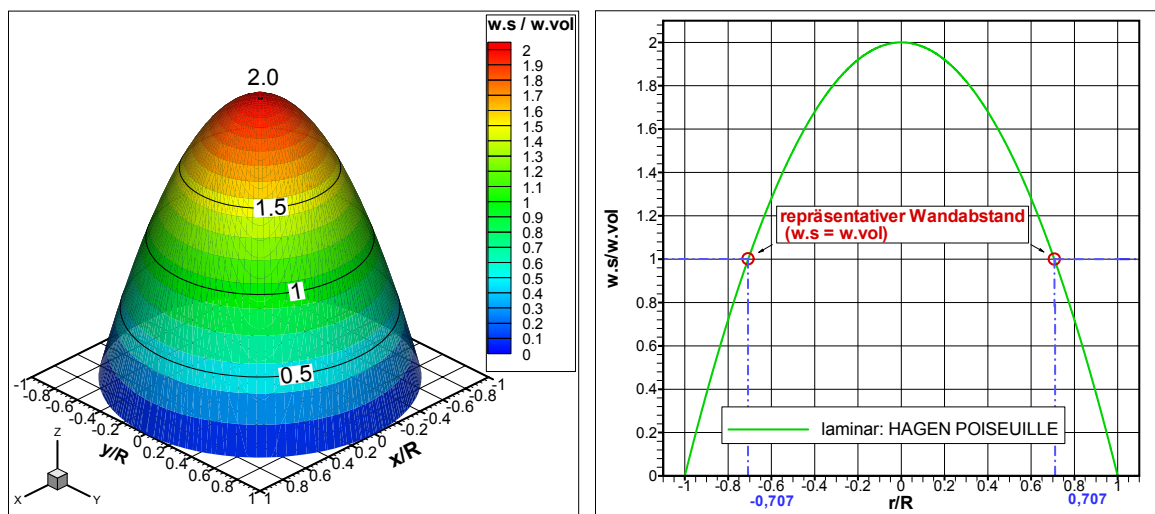


Abbildung 1: Laminares Normprofil nach HAGEN POISEUILLE

- Die vollausbildete turbulente Strömung (turbulentes Normprofil) kann grundsätzlich mittels verschiedener Ansätze beschrieben werden (z. B. Potenzgesetz, Logarithmus-Gesetze, bereichsweise Beschreibungen und Korrekturfunktionen).
- Für den vorliegenden Fall wird der Ansatz von GERSTEN & HERWIG [Ger92, Ger04] als geschlossene Beschreibung der Geschwindigkeitsverteilung in Wand- und Kernschicht gewählt (vgl. Abbildung 2).
- Gründe für diese Wahl sind:
 - Berücksichtigung des aktuellen technischen Standes durch Bezugnahme auf experimentelle Daten (vgl. „Superpipe“-Experimente am CALTECH Princeton => [McKeon et al 04])
 - Möglichkeit zur schnellen Aktualisierung durch Anpassung von Konstanten
 - geschlossene analytische Beschreibung des Strömungsprofils mit Wandzone und Kernströmung und
 - Verlauf ohne Unstetigkeit in Rohrmitte.
- Die Formeln und Konstanten für die Beschreibung nach GERSTEN & HERWIG für das hydraulisch glatte Rohr im Bereich $4'000 < Re < 300'000$ lauten gemäss [Ger04]:

$$\frac{w(r/R)}{w_{vol}} = \frac{2 \cdot Re_\tau}{Re} \cdot Z$$

mit $Re = \frac{D \cdot w_{vol}}{\nu}$ und $Re_\tau = \frac{R \cdot w_\tau}{\nu}$

sowie w_τ ... Wandschubspannungsgeschwindigkeit

$$Z = \frac{1}{\Lambda} \left[\frac{1}{3} \cdot \ln \left(\frac{\Lambda \cdot y^+ + 1}{\sqrt{(\Lambda \cdot y^+)^2 - \Lambda \cdot y^+ + 1}} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\arctan \frac{2 \cdot \Lambda \cdot y^+ - 1}{\sqrt{3}} + \frac{\pi}{6} \right) \right] + \frac{1}{4 \cdot \kappa} \ln(1 + \kappa \cdot B \cdot (y^+)^4) - \frac{\alpha}{2 \cdot \kappa \cdot a} \ln \left(1 + a \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) + \frac{1}{\kappa} \ln \left(1 + \left| \frac{r}{R} \right| \right) - \frac{\beta}{2 \cdot \kappa \cdot b} \ln \left(1 + b \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) + C_2$$

$$y^+ \left(Re_\tau, \left(\frac{r}{R} \right) \right) = y \cdot \frac{w_\tau}{\nu} = \frac{w_\tau}{\nu} \cdot R \cdot \left(1 - \left| \frac{r}{R} \right| \right) = Re_\tau \cdot \left(1 - \left| \frac{r}{R} \right| \right)$$

Iterative Ermittlung von Re_τ :

$$\frac{1}{2} \cdot Re = Re_\tau \cdot \left(\frac{1}{\kappa} \cdot \ln Re_\tau + C_1 + C_2 + C_3 \right)$$

$\kappa = 0,421$
 $A = 6 \cdot 10^{-4}$
 $B = 0,0011$
 $C_2 = 1,23$
 $\Lambda = 0,119$
 $a = -0,2714$
 $b = 5,567$
 $\alpha = -0,1656$
 $\beta = 7,735$

und

$C_1 = 5,60$
 $C_3 = -4,28$
 für $Re < 3 \cdot 10^5$:
 $C_3 = -4,28 - \frac{201}{Re_\tau}$
 $C_1 + C_2 + C_3 = 2,55 - \frac{201}{Re_\tau}$

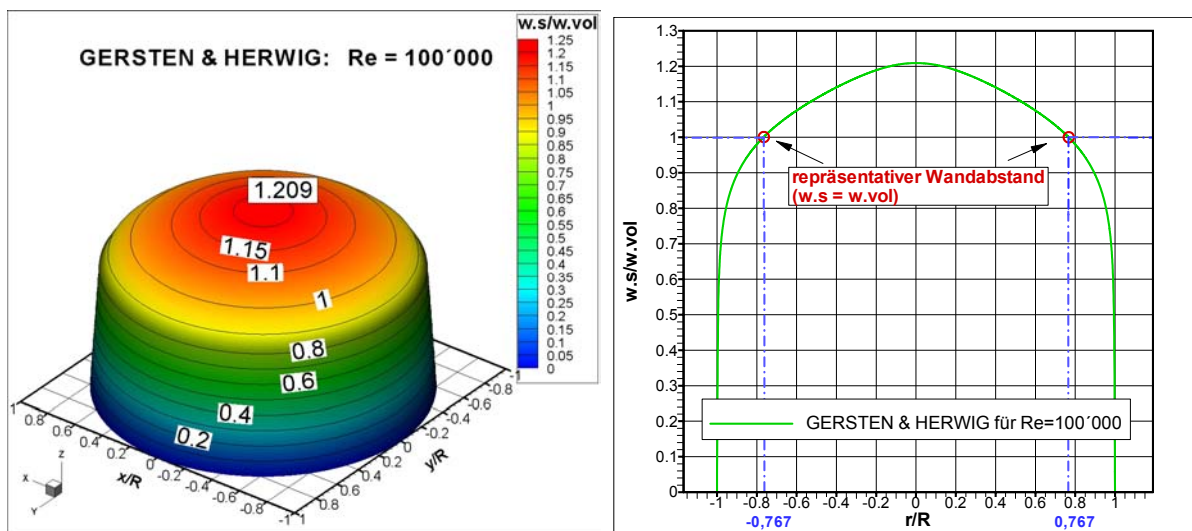


Abbildung 2: Turbulentes Normprofil nach GERSTEN & HERWIG (hier $Re = 100'000$)

- Die Abbildung 3 verdeutlicht die graphische Interpretation des Profilfaktors.

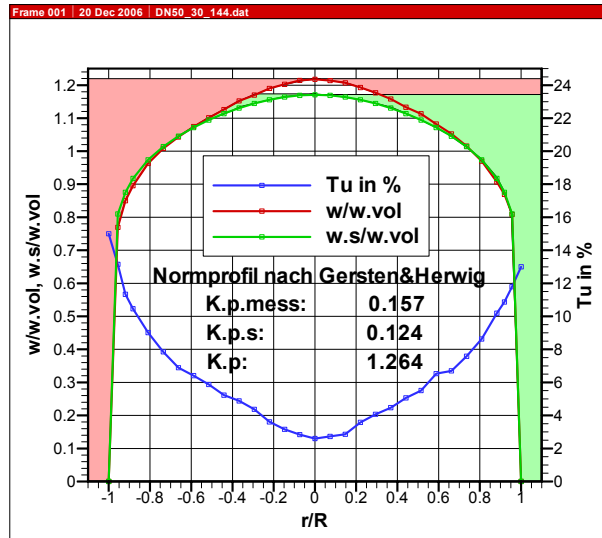


Abbildung 3: Grafische Interpretation des Profilfaktors

(rote Fläche [in der rechten Profilhälfte teilweise verdeckt]) = $\int_{-1}^1 (w_m - w) \cdot d\left(\frac{r}{R}\right)$,

grüne Fläche [in der linken Profilhälfte teilweise verdeckt] = $\int_{-1}^1 (w_{s,m} - w_s) \cdot d\left(\frac{r}{R}\right)$

b) Asymmetriefaktor

- Die Definition erfolgt in Anlehnung an die Festlegung von D_{10} nach [Yeh94]:

$$K_a = \frac{\int r \cdot w^m \cdot r^n \cdot dr}{D \int w^m \cdot r^n \cdot dr} = \frac{\int r \cdot w^1 \cdot r^0 \cdot dr}{D \int w^1 \cdot r^0 \cdot dr} = \frac{\int_{-1}^1 \left(\frac{r}{R}\right) \cdot w \cdot d\left(\frac{r}{R}\right)}{2 \cdot \int_{-1}^1 w \cdot d\left(\frac{r}{R}\right)}$$

mit $m = 1, n = 0$, Angabe in %

- Der Asymmetriefaktor ist interpretierbar als die Verschiebung des Flächen-Schwerpunktes von Einzelprofilen aus der Symmetrieebene, die Angabe erfolgt in Prozent.
- Die Abbildung 4 erklärt den Asymmetriefaktor grafisch.

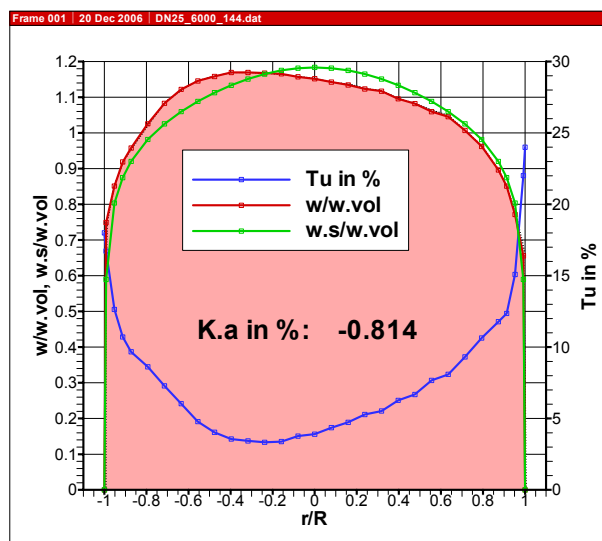


Abbildung 4: Beispiel für den Asymmetriefaktor

c) Turbulenzfaktor

- Die Turbulenz einer Strömung ist ein Mass für die Schwankung der zeitlichen Geschwindigkeit um ihren zeitlichen Mittelwert bzw. für die „Unruhe“ in einer Strömung (vgl. Abbildung 5).

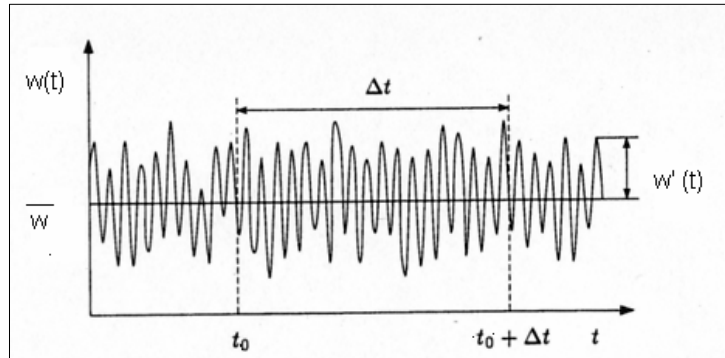


Abbildung 5: Geschwindigkeitsspektrum (\bar{w} ... zeitlicher Mittelwert der Geschwindigkeit, $w'(t)$... zeitliche Schwankungsgrösse der Geschwindigkeit)

- Experimentell erfolgt die Beschreibung der Turbulenz mit Hilfe des Turbulenzgrades, bei Betrachtung eines eindimensionalen Strömungszustandes gilt:

$$Tu = \frac{s_w}{\bar{w}} = \frac{\sqrt{w'^2}}{\bar{w}}$$

mit

Tu ... Turbulenzgrad in %

$\frac{w'}{\bar{w}}$... Schwankungsgrösse der axialen Geschwindigkeit

\bar{w} ... zeitlicher Mittelwert der axialen Geschwindigkeit

s_w ... Standardabweichung der axialen Geschwindigkeit

- Als Turbulenzfaktor wird das Verhältnis des Turbulenzgrades im Kernbereich der Strömung $-0,2 \leq r/R \leq 0,2$ zu dem Turbulenzgrad in der Rohrmitte des Normprofil definiert:

$$K_{tu} = \frac{Tu_{\max} \Big|_{r/R=-0,2}}{Tu_s \Big|_{r/R=0,2}}$$

mit Tu_{\max} ... maximaler Turbulenzgrad im Kernbereich der Strömung

Tu_s ... Turbulenzgrad in der Mitte einer ausgebildeten Strömung

- DURST et al [Dur98] geben für den Turbulenzgrad in der Mitte einer ausgebildeten Kanalströmung für $Re_m \geq 4'500$ folgenden Zusammenhang an:

$$Tu_m = \frac{w'_m}{w_m} \cong 0,13 \cdot Re_m^{-\frac{1}{8}}$$

$$\text{mit } Re_m = \frac{D \cdot w_m}{\nu} = Re \cdot \left(\frac{w_m}{w_{vol}} \right)$$

w'_m ... axiale Schwankungsgeschwindigkeit in Rohrmitte

w_m ... axiale Geschwindigkeit in Rohrmitte

- PASHTRAPANSKA [Pas04] zeigt, dass dieser Zusammenhang auch in sehr guter Näherung für Rohrströmungen anwendbar ist.
- Der Turbulenzgrad in der Mitte einer ausgebildeten Rohrströmung kann somit wie folgt näherungsweise bestimmt werden:

$$Tu_s = 0,13 \cdot \left[Re \cdot \left(\frac{w_m}{w_{vol}} \right)_N \right]_s^{-\frac{1}{8}}$$

mit $\left(\frac{w_m}{w_{vol}} \right)_s$... Geschwindigkeitsverhältnis aus Normprofil

- Die Abbildung 6 zeigt ein gemessenes Profil des Turbulenzgrades und ein Zahlenbeispiel für den Turbulenzfaktor.

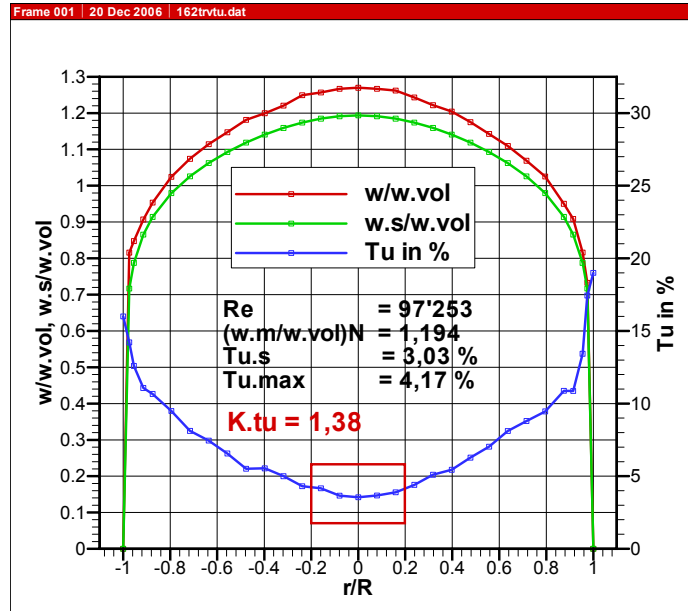


Abbildung 6: Beispiel für den Turbulenzfaktor

3.3. Tangentiale Geschwindigkeitskomponente (v)

- Für die Quantifizierung des Dralls in einer Strömung kann der Drallwinkel bzw. der maximale Drallwinkel [Yeh95] als einfaches Mass herangezogen werden:

$$\phi = \arctan(v / w_{vol}) \quad \text{mit } v \dots \text{ tangentielle Geschwindigkeit (Umfangsgeschwindigkeit)}$$

$$\phi_{\max} = \arctan(|v|_{\max} / w_{vol})$$

- Gemäss Abbildung 7 kann der Drallwinkel als Winkel für die Abweichung des Strömungsvektors von der idealen axialen Strömungsrichtung verstanden werden.

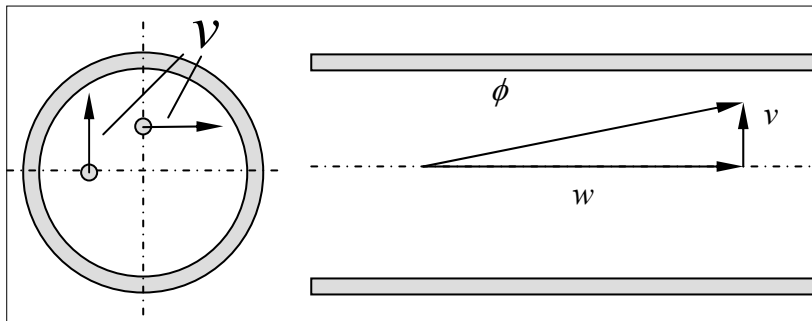



Abbildung 7: Graphische Interpretation des Drallwinkels (v...tangentielle Geschwindigkeit (Umfangsgeschwindigkeit), w...axiale Geschwindigkeit, ϕ ...Drallwinkel)

	Validierung von Kalibrier-Prüfständen	<ul style="list-style-type: none"> ➤ PTB – FB Wärme (D) ➤ PTB – FB Flüssigkeiten (D) ➤ METAS – FB Durchfluss (CH) ➤ BEV – FB Durchfluss (A) ➤ OPTOLUTION GmbH (CH) ➤ ILA GmbH (D)
-----------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Literaturverzeichnis

- [Dur98] Durst, F.; Fischer, M.; Jovanovic, J.; Kikura, H.:
Methods to set up and investigate low Reynolds number, fully developed turbulent plane channel flows.
In: J. Fluids Eng., 120 (1998), S. 496-503.
- [EN1434] European Standard EN 1434:
Wärmezähler – Teil 1 bis Teil 6.
Ausgabe 2006.
- [Ger92] Gersten, K.; Herwig, G.:
Strömungsmechanik. Grundlagen der Impuls-, Wärme- und Stoffübertragung aus asymptotischer Sicht.
1. Aufl., Vieweg-Verlag, Braunschweig Wiesbaden 1992.
- [Ger04] Gersten, K.:
Fully developed turbulent pipe flow.
In: Merzkirch, W.: Fluid mechanics of flow metering. 1. Aufl., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2005.
- [ISO5167] International Standard ISO 5167-1:
Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full.
Ausgabe 1991.
- [McKeon04] McKeon, B. J.; Li, J.; Jiang, W.; Morrison, J. F.; Smits, A. J.:
Further observations on the mean velocity in fully-developed pipe flow.
In: J. Fluid Mech. 501 (2004), S. 135-147.
- [Mick95] Mickan, B.:
Systematische Analyse von Installationseffekten sowie der Effizienz von Strömungsgleichrichtern in der Grossgasmengenmessung.
Dissertation, Shaker Verlag, Essen 1995.
- [Pas04] Pasztrapanska, M.:
Experimentelle Untersuchung der turbulenten Rohrströmung mit abklingender Drallkomponente.
Dissertation, Universität Erlangen 2004.
- [Yeh94] Yeh, T., T.; Mattingly, G., E.:
Pipeflow downstream of a reducer and its effects on flowmeters.
In: J. Flow Meas. Instrum. 5 (1994), S. 181-187.
- [Yeh95] Yeh, T., T.; Mattingly, G., E.:
Laser Doppler Velocimeter studies of the pipeflow produced by a generic header.
NIST Technical Note 1409; National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg 1995.

Anlage: Beispiel für die Auswertung von Messergebnissen mittels Kennzahlen

Messbedingungen:

- DN 20, Rohr-Innendurchmesser $D = 19,8 \text{ mm}$
- Nenn-Volumenstrom $Q = 500 \text{ l/h}$, Wasser-Temperatur $T_w = 50 \text{ °C}$, Wasserdruck $p_w = 7,2 \text{ bar}$
- REYNOLDS-Zahl $Re = 16'205$
- 15D Abstand von einer MITSUBISHI-Gleichrichterbaugruppe.

Messergebnisse:

- Axiale Geschwindigkeiten und Turbulenzgrade:
 - LDV-Messungen im Strömungsquerschnitt mit 281 Messpunkten und 2'000 Einzelsignalen pro Messpunkt.
- Tangentiale Geschwindigkeiten:
 - LDV-Messungen entlang eines Durchmesserpfades (90° zu beiden Krümmungsebenen eines Raumkrümmers am Beginn der Prüfstrecke) mit 50 Messpunkten und 2'000 Einzelsignalen pro Messpunkt.

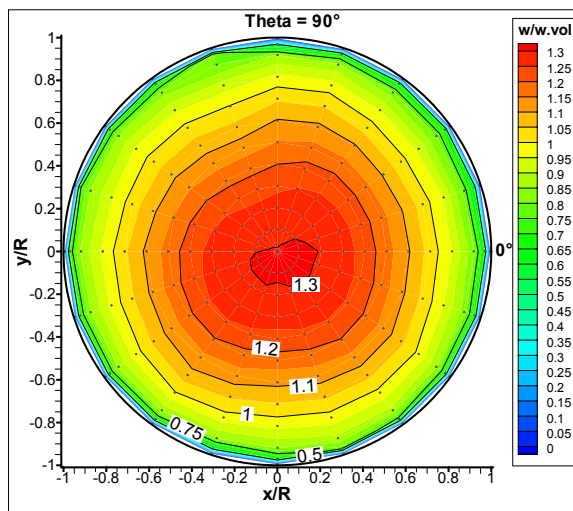


Bild A1: Verteilung der axialen Geschwindigkeit (2D-Darstellung)

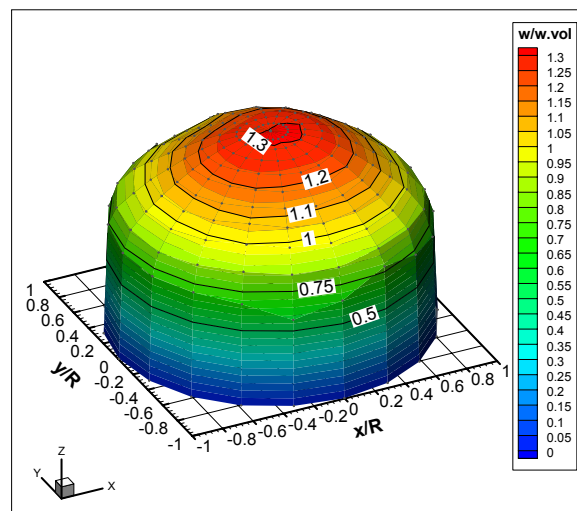


Bild A2: Verteilung der axialen Geschwindigkeit (3D-Darstellung)

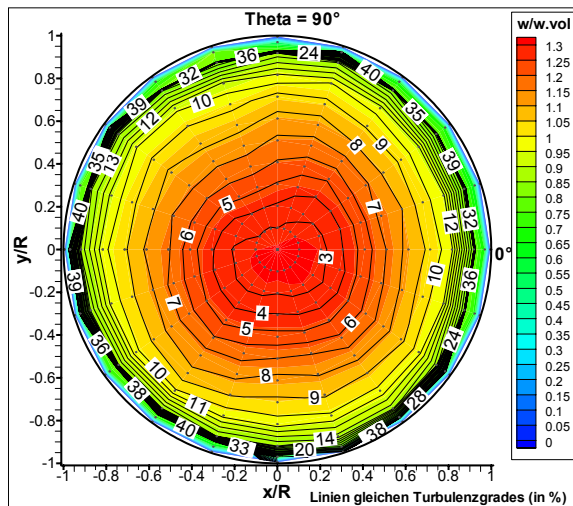


Bild A3: Verteilung des Turbulenzgrades (bis $Tu_{max} = 40 \%$)

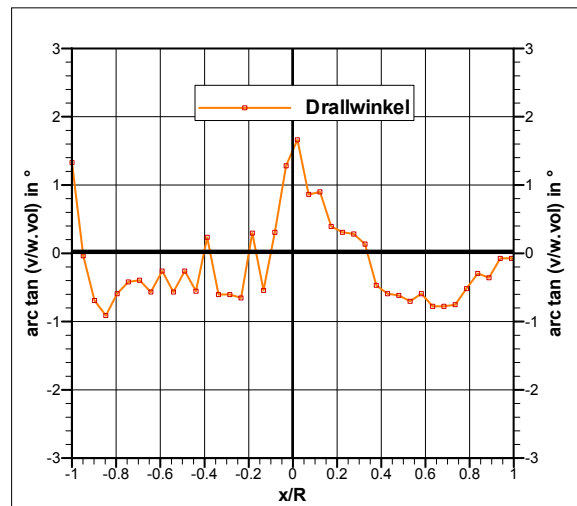


Bild A4: Profil der tangentialen Geschwindigkeit entlang eines Durchmesser-Pfades

Tabelle A1: Ergebnistabelle der Kennzahlenberechnung

Q in l/h:		497.00		w_{s,m}/w_{vol}:	1.280
w_{vol} in m/s		0.4576		w_m/w_{vol}:	1.303
T_w in °C:		50		w_m/w_{s,m} in %:	1.80
p_w in bar:		7.2		K_{p,s}:	0.181
Re:		16'217		Tu_s in %:	3.75
Theta					
		w_{a,l}/w_{s,a} in %	w_{a,r}/w_{s,a} in %	K_p	K_a in %
Vollprofile	0	-2.45	-1.35	1.032	0.16
	18	-2.75	-1.06	1.044	0.29
	36	-3.50	0.52	1.024	0.37
	54	-2.49	2.34	1.004	0.40
	72	-0.44	0.28	1.028	0.03
	90	-1.19	-0.80	1.070	0.28
	108	-5.00	0.37	1.056	0.57
	126	-3.50	0.99	1.043	0.56
	144	-2.31	1.02	1.029	0.32
	162	-2.90	-1.89	1.054	0.05
Min.-Wert		-5.00	-1.89	1.004	0.03
Max.-Wert		-0.44	2.34	1.070	0.57
Max.- Wert 		5.00	2.34	1.070	0.57
Ø*				1.038	0.74
u = 2s in %				3.67	13.53
* arithmetisch					* im Bereich -0.2 ≤ r/R ≤ 0.2

In Tabelle A1 sind zusätzlich zu den definierten Kennzahlen das Verhältnis der gemessenen Geschwindigkeiten in Rohrmittle zur Geschwindigkeit des Normprofils in Rohrmittle ($w_m/w_{s,m}$) sowie die Verhältnisse der gemessenen Geschwindigkeiten beim repräsentativen Wandabstand (hier vereinfacht am AICHELEN-Punkt bei $r/R = 0,762$) der jeweils linken und rechten Profilhälften zu den zugehörigen Geschwindigkeiten des Normprofils enthalten ($w_{a,l}/w_{s,a}$ und $w_{a,r}/w_{s,a}$).

Darstellung von ausgewählten Einzelprofilen:

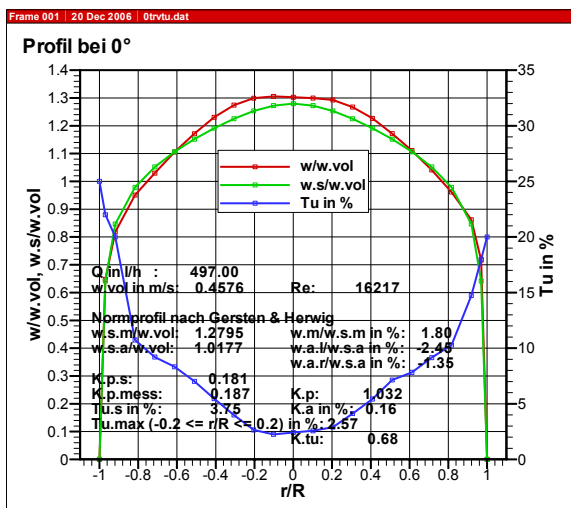


Bild A5: Einzelprofil bei Theta = 0° (vgl. Bild A1)

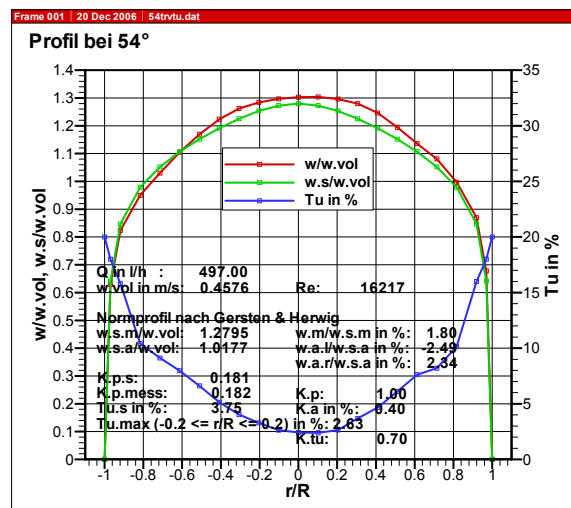


Bild A6: Einzelprofil bei Theta = 54°

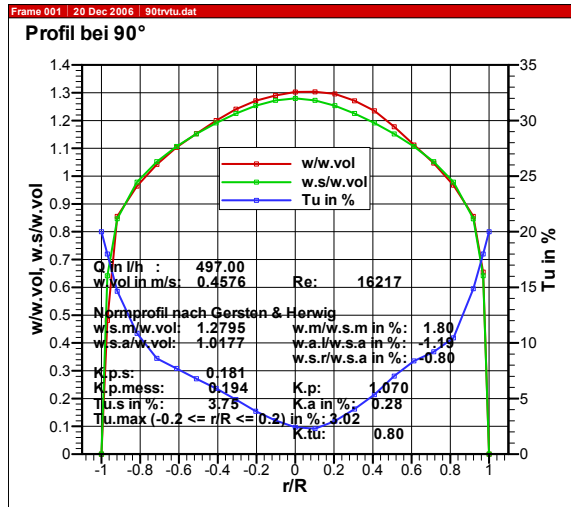


Bild A7: Einzelprofil bei Theta = 90°

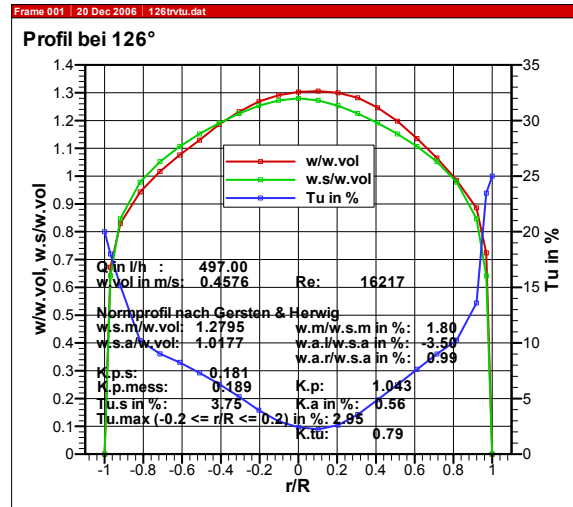


Bild A8: Einzelprofil bei Theta = 126°

Zeichenerklärung:

D	Rohrinnendurchmesser
K_a	Asymmetriefaktor
K_p	Profilfaktor
$K_{p,mess}$	Profilzahl des gemessenen Profils
$K_{p,s}$	Profilzahl des Normprofils
K_{tu}	Turbulenzfaktor
p_w	Wasserdruck
Q	Volumenstrom
q_p	Nenn-Volumenstrom (p...permanent)
q_i	minimaler Volumenstrom (i...inferior)
R	Rohrinnenradius
r	lokaler Rohrinnenradius
Re	REYNOLDS-Zahl
T_w	Wassertemperatur
Theta	Winkel der Durchmessersebenen zur positiven x-Achse
Tu	gemessener Turbulenzgrad der axialen Geschwindigkeit
Tu_s	Turbulenzgrad des Normprofils in Rohrmitte ($r/R = 0$)
Tu_{max}	maximaler gemessener Turbulenzgrad im Kernbereich der Strömung $-0,2 \leq r/R \leq 0,2$
v	gemessene tangentielle Geschwindigkeit (Umfangsgeschwindigkeit)
w	gemessene lokale axiale Geschwindigkeit
$w_{a,l}$	gemessene axiale Geschwindigkeit beim repräsentativen Wandabstand ($w = w_{vol}$) der linken Profilhälfte
$w_{a,r}$	gemessene axiale Geschwindigkeit beim repräsentativen Wandabstand ($w = w_{vol}$) der rechten Profilhälfte
w_m	gemessene axiale Geschwindigkeit in Rohrmitte ($r/R = 0$)
w_s	lokale axiale Geschwindigkeit des Normprofils
$w_{s,a}$	axiale Geschwindigkeit des Normprofils beim repräsentativen Wandabstand ($w_s = w_{vol}$)
$w_{s,m}$	axiale Geschwindigkeit des Normprofils in Rohrmitte ($r/R = 0$)
w_{vol}	volumetrische Geschwindigkeit
x	lokale Position in x-Richtung
y	lokale Position in y-Richtung
ϕ	Drallwinkel
ν	kinematische Viskosität
LDV	Laser Doppler Velocimetry/Anemometrie
DFS	Durchfluss-Sensor