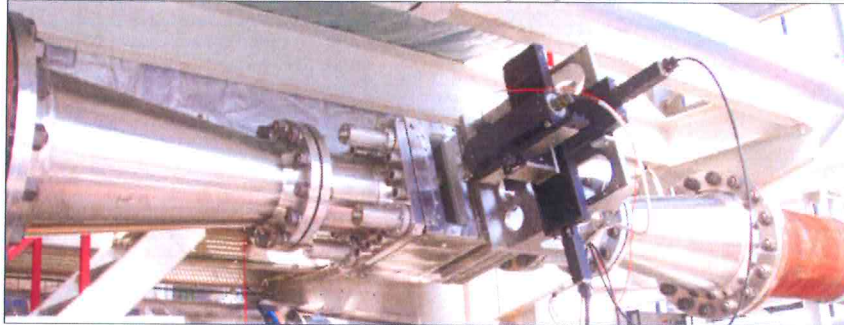




Einsatz der LDV zur Volumenstrom-Messung unter Betriebsbedingungen



Autoren: Dr.-Ing. Ulrich Müller
OPTOLUTION GmbH
www.optolution.ch

Dr.-Ing. Michael Dues
ILA GmbH
www.ila.de

Dipl.-Ing. Michael Utz
Fernwärme Wien GmbH
www.fernwaermewien.at

Dr. Thomas Lederer
PTB Berlin, FB 7.6
www.ptb.de



Gliederung

1. Projektvorstellung
2. Messtechnik im HKW Kagran/Wien
 - 2.1 Versuchsanlage
 - 2.2 LDV-Messtechnik und Package
 - 2.3 Datenmanagement
3. Messergebnisse
 - 3.1 Messprogramm
 - 3.2 LDV-Volumenstrom-Messung
 - 3.3 Analyse der DFS-Messunsicherheiten
 - 3.4 Kalt-/Warmversatz von DFS
 - 3.5 Temperatur-Messungen
4. Ausblick
5. Zusammenfassung



1. Projektvorstellung

LDV zur Volumenstrombestimmung unter Betriebsbedingungen

Projekt der Fernwärme Wien GmbH in Zusammenarbeit mit:

- PTB Berlin, Fachbereich Wärme, Dr. Lederer
- ILA GmbH, Jülich (D)
- OPTOLUTION GmbH, Reinach (CH) und weiteren Partnern (z. B. DI Witt, Prof. Adunka)

Ziele:

1. Entwicklung und Anwendung eines metrologisch zertifizierten **Messverfahrens** zur Überprüfung der Messrichtigkeit von installierten Durchfluss-Sensoren (DFS) grosser Nennweite unter Betriebsbedingungen
2. Bau und Verfügbarkeit einer **Anlage** zum Vergleich, der Überprüfung und der Kalibrierung von DFS (DN 400-600) unter Betriebsbedingungen (Fluid-Eigenschaften, Instationaritäten, Strömungsverhältnissen) mit einem zertifizierten Messverfahren



1. Projektvorstellung

Nutzen:

- Langzeit-Analyse von Messbeständigkeiten und Messunsicherheiten von konventionellen Durchfluss-Messgeräten (MID, Ultraschall (in-line und clamp-on), Blende, ...) unter Betriebsbedingungen
- Untersuchungen zu Empfindlichkeiten gegenüber gestörten Einlaufbedingungen und nicht idealen Strömungsverhältnissen (Unsymmetrie, Drall)
- Vor-Ort-Kontrolle der Messunsicherheiten von konventionellen Durchfluss-Messgeräten unter Betriebsbedingungen am Einbauort

Somit:

- Verbesserung von Messrichtigkeit und Messstabilität der Gross-Messstellen und Übergabestationen
- Erhöhung der Messsicherheit
- Verringerung der Bilanzverluste und Abrechnungsunsicherheiten (!)



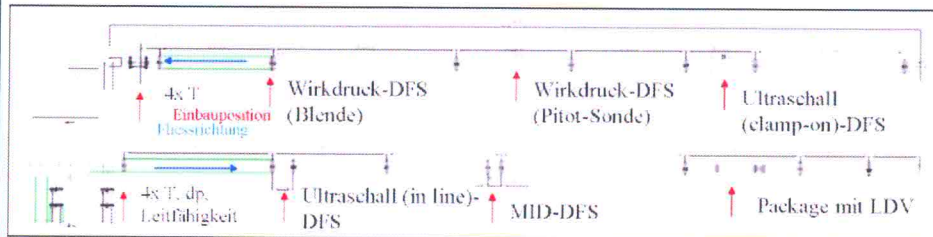
1. Projektvorstellung

Realisierung im Projekt:

- Ermittlung des Volumenstromes unter Praxisbedingungen ($Q_{\max} = 1'000 \text{ m}^3/\text{h}$, $T_{\max} = 120^\circ\text{C}$, $p_{\max} = 25 \text{ bar}$, DN 400-600) mittels LDV:
 - Optischer Zugang zum Fluid durch Fensterkammer mit Glasrohr
 - Messungen der örtlichen Geschwindigkeit
 - Algorithmen zur Berechnung des Volumenstromes aus Verteilungen der Geschwindigkeit (Netzmessung) und aus Messungen der Geschwindigkeit an ausgewählten Punkten
- Metrologische Rückführung auf Primärnormal der PTB Berlin:
 - Simulation der Praxisbedingungen auf Grosswärme-Prüfstand der PTB Berlin
 - Nachweis der Eigenschaften des Messverfahrens im Vergleich zu verschiedenen Normalen
 - Zertifizierung

2. Messtechnik im HKW Kagran

2.1 Versuchsanlage



2.1 Versuchsanlage - Messregime

• Zwangsbetrieb:

- Vorgabe des Volumenstroms, Fluidtemperatur abhängig von Netzzustand
- Für Kalibrierung von DFS notwendig
- Fahrweise während der 1. und 4.-5. Messkampagne:
 - 100 m³/h bis 700 m³/h, 56°C – 57°C
 - Standardabweichung $s.Q \leq 2\%$

• Freilaufender Betrieb (wie Netzzustand):

- instationär bzgl. Volumenstrom und Fluidtemperatur
- Fahrweise während der 2. Messkampagne:
 - 295 m³/h bis 490 m³/h, 56 °C bis 73°C (Durchschnittswerte)
 - Standardabweichungen $s.Q = (14 \dots 31)\%$, $s.T = (1 \dots 16)\%$
- Fahrweise während der 3. Messkampagne:
 - 205 m³/h bis 460 m³/h, 56 °C bis 74°C (Durchschnittswerte)
 - Standardabweichungen $s.Q = (7 \dots 19)\%$, $s.T = (2 \dots 6)\%$



7

ILA

OPTOLUTION
messtechnische lösungen

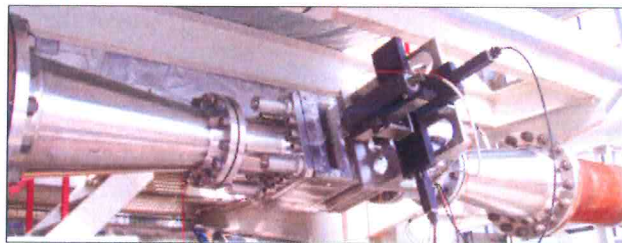
PTB

WIEN ENERGIE
— FERNWÄRME WIEN —

2.2 LDV-Messtechnik und Package

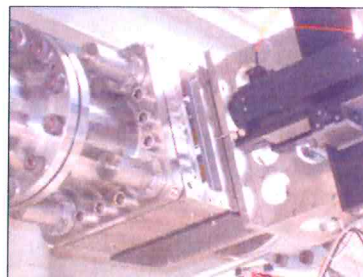
ILA-ID- fp50-LDV-System:

- ungeschiftet
- Nd-YAG-Laser: 532 nm 75 mW
- Sendelinsen-Brennweite 250 mm
- Streifenabstand 2,963 μm
- Kalibrierung mit Plattenteller
+/- 0,05 %
- Messvolumenlänge 1,97 mm
- Traversierungen 300 mm



Referenz-MID:

- KROHNE OPTIFLUX 4300 W
- DN 200, ETFE, Hastelloy
- $\pm 0,3\%$ v. MW für $v > 1$ m/s (Spez.)
- $\pm 0,2\%$ v. MW für $v > 4$ m/s (Spez.)
- Wdhl.-barkeit $\pm 0,06\%$ (Spez.)
- 0,1 l/Impuls, $t = 1$ s
- ModBUS-Kommunikation



8

ILA

OPTOLUTION
messtechnische lösungen

PTB

WIEN ENERGIE
— FERNWÄRME WIEN —

2.2 LDV-Messtechnik und Package

Ermittlung des Volumenstromes

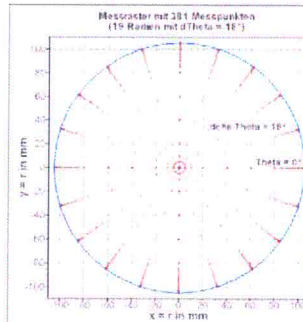
- Messung der lokalen Geschwindigkeiten:
 - Ganzfeld-Verfahren (viele Messpunkte über den gesamten Rohrquerschnitt)
 - Mehrpunkt-Verfahren (ausgewählte Punkte im Rohrquerschnitt)
 - Einpunkt-Verfahren
- Berechnung des Volumenstromes:
 - numerische Integration (für Ganzfeld-Verfahren)
 - Funktionsregression mit analytischer Integration (für Ganzfeld- und Mehrpunkt-Verfahren)
 - Berechnung mittels charakteristischer Geschwindigkeiten
 - Berechnung mittels volumetrischer Geschwindigkeit

⇒ hier: Ganzfeld-Verfahren mit numerischer Integration, da:

- Genauestes Verfahren
- Benötigte Messzeit unkritisch ist
- Höchste örtliche Auflösung (Erkennung von Strömungscharakteristiken)

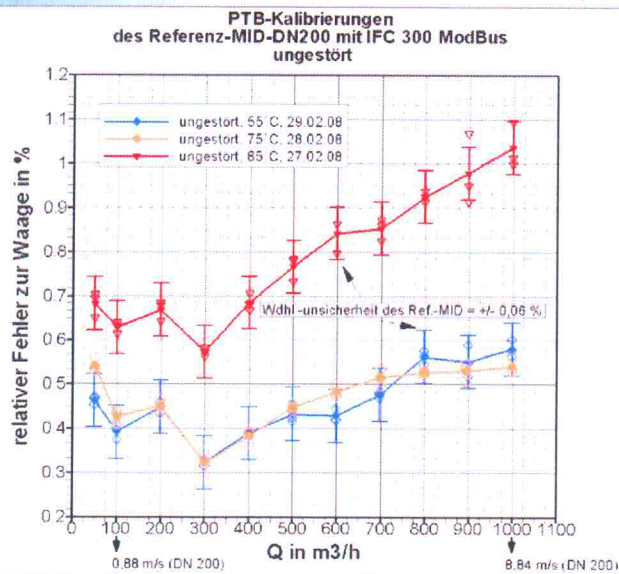
• deshalb z. B. auch: Untersuchung des Einfluss der Anzahl von Messpunkten

- 241 Messpunkte (12 Radien)
- 281 Messpunkte (14 Radien)
- 381 Messpunkten (19 Radien)
- 561 Messpunkten (28 Radien)



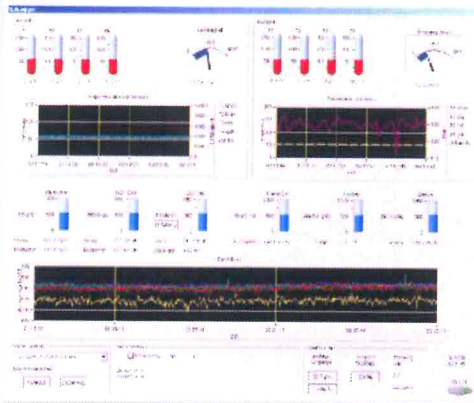
2.2 LDV-Messtechnik und Package

Kalibrierergebnisse
des Referenz-MID am
Grosswärme-Prüfstand
der PTB Berlin



2.3 Datenmanagement

- zentralisierter Datenzugriff über Datenserver (Schaltschrank I)
- Einbindung analoger und digitaler Datenübertragungen
- Verknüpfung mit den Daten des LDV-Systems (Schaltschrank II)
- on-line-Visualisierung und Archivierung der Daten



Konventionelle Messtechnik:

- DFS: MID, US-Vierpfad, Blende, US-Clamp-on, Wirkdruck-Sonde (Warmwasser-Kalibrierung bei PTB Berlin)
- Druck-, Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen
- Datenabfrage für alle Messgeräte je 1 s

11

ILA OPTOLUTION
messtechnische Lösungen

PTB WIEN ENERGIE
— FERNWÄRME WIEN —

2.3 Datenmanagement

Reader-Bildschirm
(z. B. auf LDV-PC und
für Fernabfrage)



12

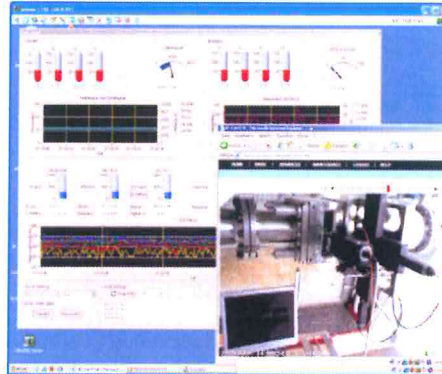
ILA OPTOLUTION
messtechnische Lösungen

PTB WIEN ENERGIE
— FERNWÄRME WIEN —

2.3 Datenmanagement - Fernsteuerung via Internet



- **Fernsteuerung des LDV-Messsystems:**
 - Zugriff auf LDV-PC
 - Einstellung aller Systemparameter der LDV-Software
 - Steuerung der Traversierungen inkl. Referenzfahrten
 - Non-stop-Betrieb der Messungen
- **Fernsteuerung der Datenaufnahme der konventionellen Messtechnik:**
 - Zugriff auf Logger-PC
 - Einstellung der Parameter für die Datenaufnahme durch Logger
 - Start und Stopp der Messungen
- **Visuelle Überwachung des LDV-Systems:**
 - Mittels schwenk- und zoombarer Überwachungskamera



13

3. Messergebnisse

3.1 Messprogramm



Bisher Durchführung von fünf Messkampagnen innerhalb von 12 Monaten :

- **Betriebsregime:** Zwangsbetrieb und freilaufender Betrieb
- **Volumenströme:**
 - quasistationär: $200 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q \leq 700 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,48 \text{ m/s} \leq w_{\text{vol, DN400}} \leq 1,64 \text{ m/s}$
 $1,66 \text{ m/s} \leq w_{\text{vol, DN200}} \leq 5,81 \text{ m/s}$)
 - instationär: $210 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q_m \leq 465 \text{ m}^3/\text{h}$ ($Q_{\text{min}} = 137 \text{ m}^3/\text{h}; Q_{\text{max}} = 588 \text{ m}^3/\text{h}$)
- **Fluidtemperaturen:**
 - quasistationär: $56^\circ\text{C} \leq T \leq 61^\circ\text{C}$
 - instationär: $59^\circ\text{C} < T_m < 74^\circ\text{C}$ ($T_{\text{min}} = 59^\circ\text{C}; T_{\text{max}} = 91^\circ\text{C}$)
- **Fluiddrücke:** $10,5 \text{ bar} \leq p \leq 17 \text{ bar}$
- **REYNOLDS-Zahlen:**
 - für DFS-Prüflinge (DN 400) $0,36 \cdot 10^6 < Re_m < 1,62 \cdot 10^6$
 - für LDV-Package (DN 200) $0,69 \cdot 10^6 < Re_m < 3,06 \cdot 10^6$
- **LDV-Parameter:**
 - LDV-Bursts/Sekunde: $10 \text{ Hz} < f_{\text{LDV,MP}} < 200 \text{ Hz}$
 - Anzahl LDV-Bursts/Messpunkt: $100 \leq n_{\text{LDV,MP}} \leq 10000$
 - Pro Messpunkt: $5 \text{ s} \leq t_{\text{LDV,MP}} \leq 120 \text{ s}$
 - Anzahl LDV-Messpunkte pro Verteilung: 241/281/381/561
 - Für Geschwindigkeitsverteilungen: $72 \text{ min} \leq t_{\text{LDV,t}} \leq 675 \text{ min}$

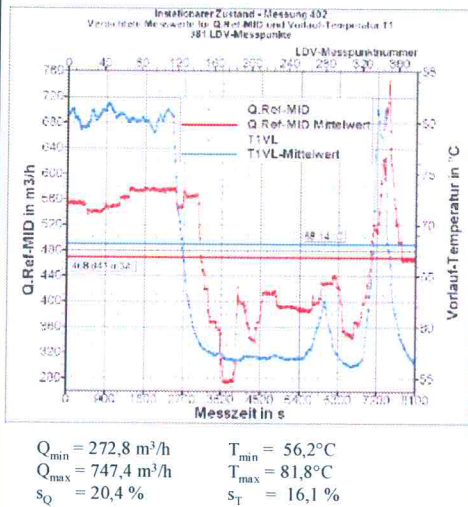
=> Total ca. 200 Messungen

14

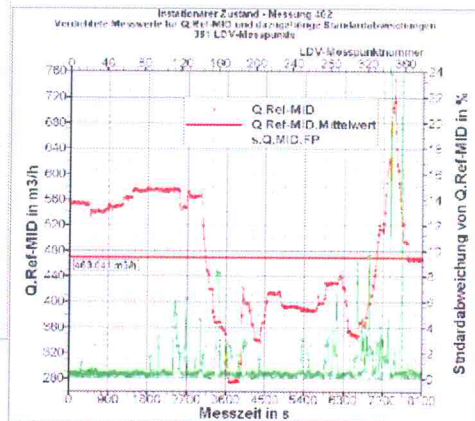
3.2 LDV-Volumenstrom-Messung Instationärer Betrieb



Beispiel für verdichtete Messwerte:



Schwankungen von Q auch innerhalb der LDV-Messzeit
an einem Messpunkt (!)

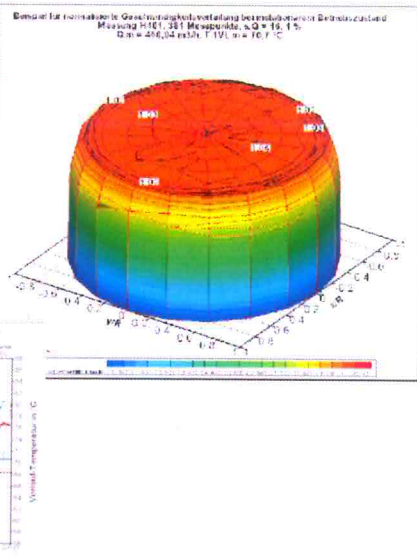
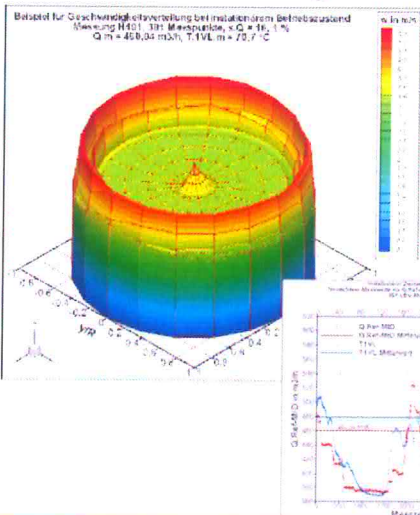


15

3.2 LDV-Volumenstrom-Messung Instationärer Betrieb

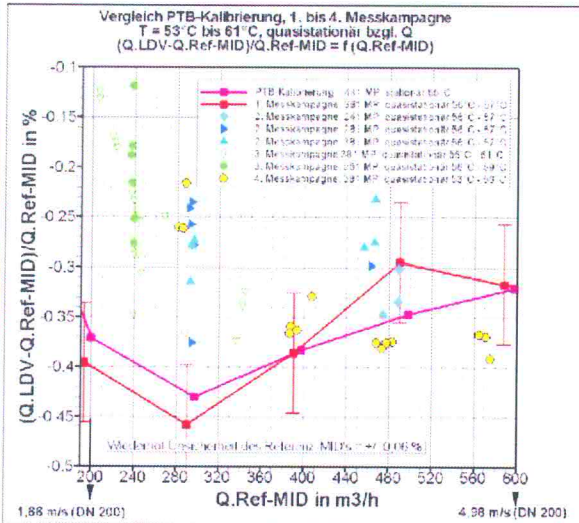


Beispiel für Normalisierung der Messwerte



16

3.2 LDV-Volumenstrom-Messung Zusammenfassung bis 4. Messkampagne



- noch zu geringe Datenbasis (!)
- MU ist weitgehend unabhängig von Q (und T)
- geringer Einfluss der Messpunktzahl bei „richtiger“ Wahl der Messradien
- systematischen Messfehler in der Größenordnung von -0,2 % erkannt (!)

17

3.2 LDV-Volumenstrom-Messung Zusammenfassung bis 4. Messkampagne

- sehr gute Bestätigung der Messergebnisse der PTB-Kalibrierungen und der 1. Messkampagne:

Parameter	Messreihe	Betriebs- regime	Q-Betriebspunkte		
			200...270 m ³ /h	290...330 m ³ /h	460...490 m ³ /h
Messunsicher- heit in %	PTB-Kalibrierung	stationär	-0.39	-0.43	-0.35
	1. Messkampagne	quasistationär	-0.43	-0.45	-0.30
	2. Messkampagne	quasistationär		-0.32	-0.30
	3. Messkampagne	quasistationär	-0.23	-0.35	
Wiederholun- gsicherheit in %	2.+3. Messkampagne	quasistationär	(± 0.10)		
		instationär	(± 0.20)		
	4. Messkampagne	quasistationär	(± 0.10)		

- Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Verfahrens auch bei stark instationären Vorgängen
- Messunsicherheiten bei instationären Bedingungen sind von vielen Einflussfaktoren abhängig
- geringe Einflüsse der untersuchten Messpunkt-Anzahlen und der untersuchten Temperatur-Niveaus
- Datenbasis muss noch weiter verbreitert werden

18

3.3 Analyse der DFS-Messunsicherheiten Messbedingungen

- Zeiträume:
 1. MK: 15.09. bis 20.09.2008
 2. MK: 17.11. bis 27.11.2008
 3. MK: 16.12. bis 08.01.2009
 4. MK: 02.05. bis 15.05.2009
 5. MK: 10.07. bis 09.08.2009
- Volumenzählerstände:
 2. MK: ca. 125'200 m³ bis ca. 200'400 m³
 3. MK: ca. 317'300 m³ bis ca. 400'000 m³
 4. MK: ca. 600'000 m³ bis ca. 750'000 m³
 5. MK: ca. 1'153 000 m³ bis ca. 1'500'000 m³

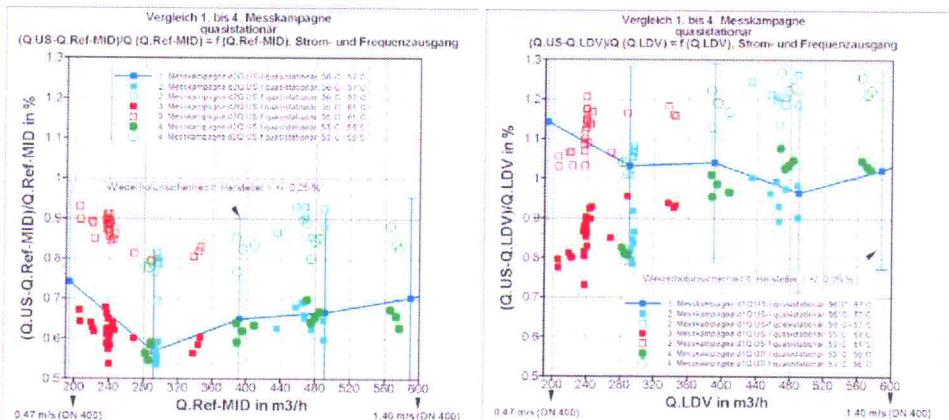
(bei 300 m³/h: ca. 5'000 h = 208 d)

Fragestellungen:

- Unterscheidung von quasistationärem und instationärem Betrieb
- Einfluss der Instationaritäten:
 - bzgl. mittlerer Temperatur (=> vier Niveaus: 56°C ... 57°/ 59°C ... 62°C / 66°C – 68°C / 70°C – 72°C)
 - bzgl. Schwankungen (Standardabweichungen) der Temperatur
 - bzgl. mittlerem Volumenstrom
 - bzgl. Schwankungen (Standardabweichungen) des Volumenstromes
- „Alterungseffekte“ bzgl. Messunsicherheit (Messstabilität) der DFS

19

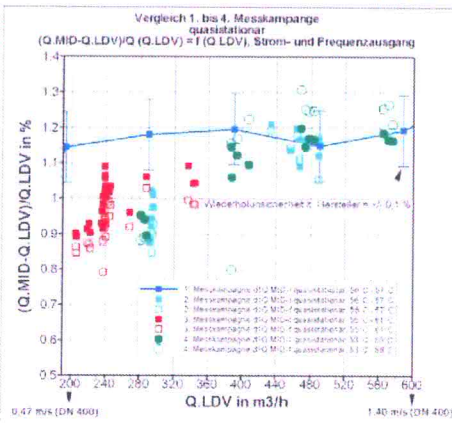
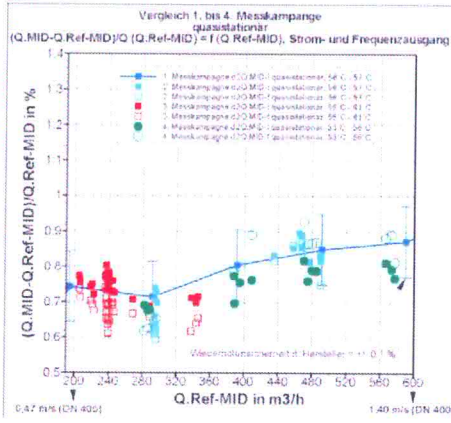
3.3 Analyse der DFS-Messunsicherheiten Ultraschall-DFS (inline) - bis 4. MK



- generell: nahezu keine Abhängigkeit der MU von Q im untersuchten engen Q-Bereich
- generell: fast alle Messwerte innerhalb der Wiederholunsicherheitsangabe des Herstellers
- generell: Bestätigung des Versatzes der MU der Frequenzgänge um ca. 0,2 %
- Q.LDV: Bestätigung des Versatzes von ca. -0,20 % bei Q ≈ 290 m³/h bei 2. MK gegenüber 1. MK

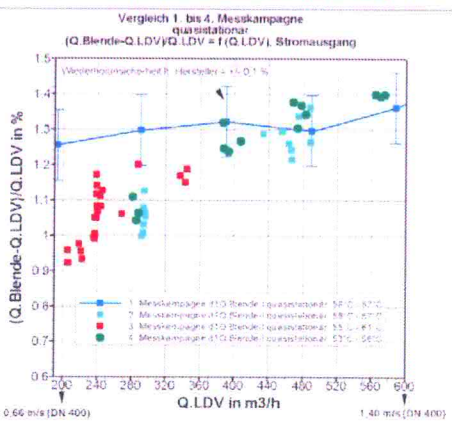
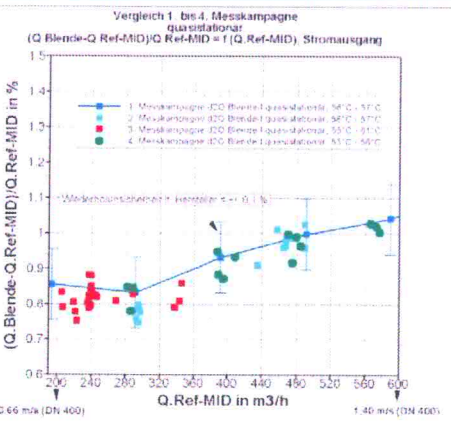
20

3.3 Analyse der DFS-Messunsicherheiten MID-DFS bis 4. MK



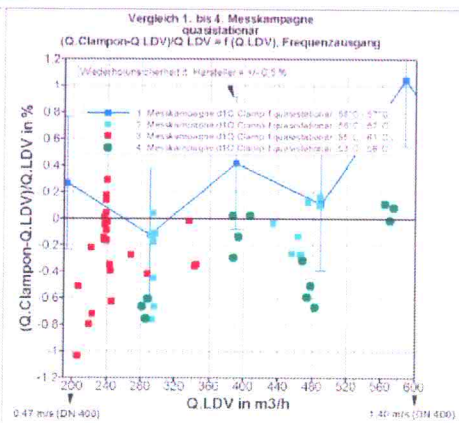
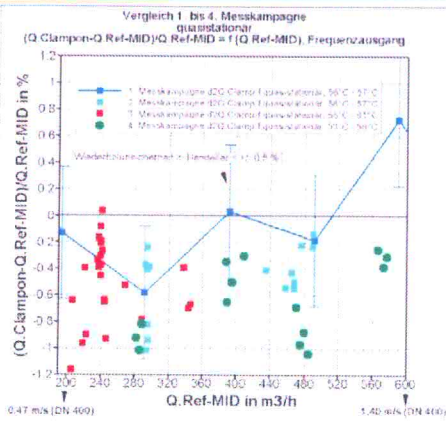
- Q.Ref-MID: fast alle Messwerte innerhalb der Wiederholunsicherheitsangabe des Herstellers
- generell: nur geringe Abweichungen zwischen Strom- und Frequenzgang (< 0,1 %)
- Q.LDV: Versatz von ca. -0,15 % bei Q ≈ 200...330 m³/h gegenüber 1. MK

3.3 Analyse der DFS-Messunsicherheiten Blende-DFS – bis 4. MK



- Q.Ref-MID: alle Messwerte innerhalb der Wiederholunsicherheitsangabe des Herstellers –
- Q.LDV: Messwerte für quasistationären Zustand bei Q ≈ 400...570 m³/h innerhalb der WU-Angabe des Herstellers
- Q.LDV: Versatz von ca. -0,25 % bei Q ≈ 200...330 m³/h

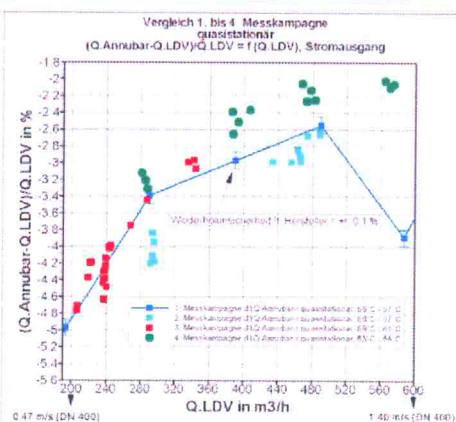
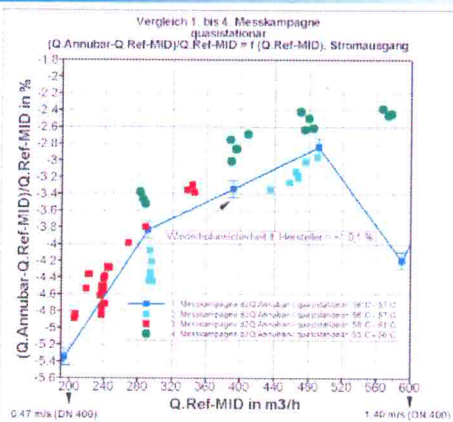
3.3 Analyse der DFS-Messunsicherheiten Ultraschall-Clamp-on-DFS – bis 4. MK



- generell: bei 4. MK Messwerte ab 500 m³/h ausserhalb der Wiederholunsicherheitsangabe des Herstellers
- Q.LDV: Versatz von ca. -0,3 % bei Q ≈ 200...290 m³/h

23

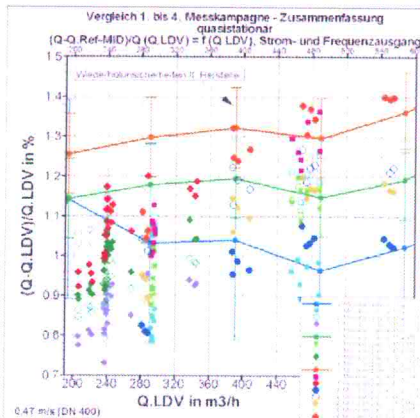
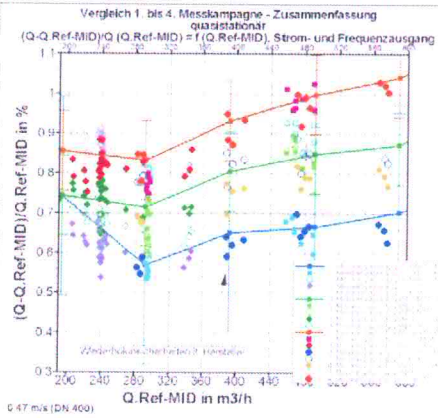
3.3 Analyse der DFS-Messunsicherheiten Wirkdrucksonde-DFS (ANNUBAR) – bis 4. MK



- generell: alle Messwerte der 4. MK ausserhalb der Wiederholunsicherheitsangabe von $\pm 0,1\%$ vom Hersteller (!)
- generell: grösste Variation der Messunsicherheit aller untersuchten DFS und grösste absolute Messunsicherheiten

24

3.3 Analyse der DFS-Messunsicherheiten Zusammenfassung – bis 4. MK



- Relativierung der Messergebnisse für quasistationäre Betriebszustände für US-, MID- und Blende-DFS

3.3 Analyse der DFS-Messunsicherheiten Zusammenfassung

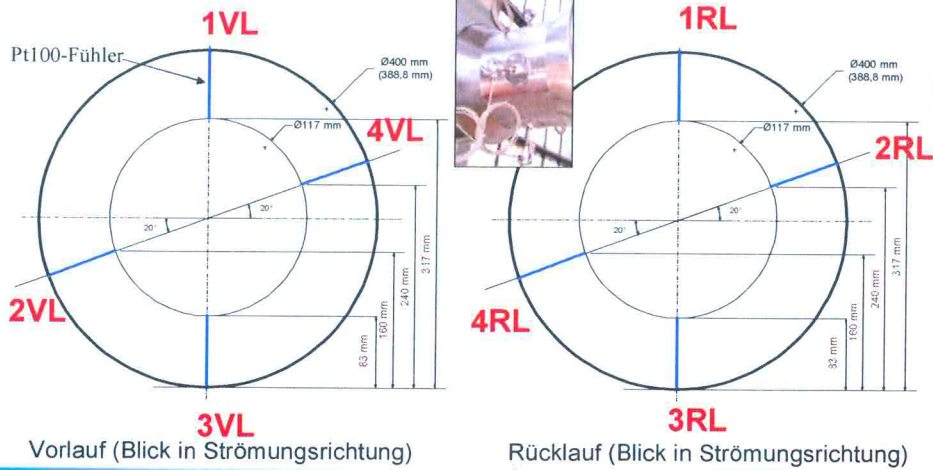
- für quasistationären Betrieb bis 4. Messkampagne:

DFS	Signal-Ausgang	Bezug Q.Ref-MID							Bezug Q.LDV						
		Messunsicherheit (MU) in %					dMU zu 1. Messkampagne (2. MK)	Wiederholungsicherheit in %	Messunsicherheit (MU) in %					dMU zu 1. Messkampagne (2. MK)	Wiederholungsicherheit in %
		ca. 240	ca. 300	ca. 400	ca. 480	ca. 570	240...570	240...570	ca. 240	ca. 300	ca. 400	ca. 480	ca. 570	240...570	240...570
US-inline	Strom	0.62	0.57	0.62	0.66	0.65	< 0.05	± 0.05	0.85	0.82	0.97	1.04	1.03	-0.25	± 0.10
	Frequenz	0.88	0.78	0.82	0.85	0.86	< 0.05	± 0.05	1.11	1.03	1.17	1.21	1.22	< 0.05	± 0.05
MID	Strom	0.76	0.69	0.75	0.79	0.79	< 0.05	± 0.05	0.98	0.92	1.11	1.17	1.17	-0.20	-0.05
	Frequenz	0.68	0.62	0.80	0.87	0.88	< 0.05	± 0.05	0.97	0.89	1.20	1.26	1.24	< 0.05	± 0.05
Blende	Strom	0.82	0.82	0.92	0.96	1.02	< 0.10	± 0.05	1.05	1.05	1.27	1.34	1.40	-0.25	± 0.10
	Frequenz	0.82	0.82	0.92	0.96	1.02	< 0.10	± 0.05	1.05	1.05	1.27	1.34	1.40	-0.25	± 0.10
US-Clamp-on	Frequenz	-0.46	-0.91	-0.49	-0.88	-0.31	0.20 - 1.05	± 0.20	-0.23	-0.67	-0.18	-0.41	0.07	0.5 - 1.0	± 0.20
ANNUBAR	Strom	-4.52	-3.48	-2.88	-2.52	-2.39	0.20 - 1.80	± 0.20	-4.30	-3.22	-2.51	-2.19	-2.05	0.20 - 1.80	± 0.20

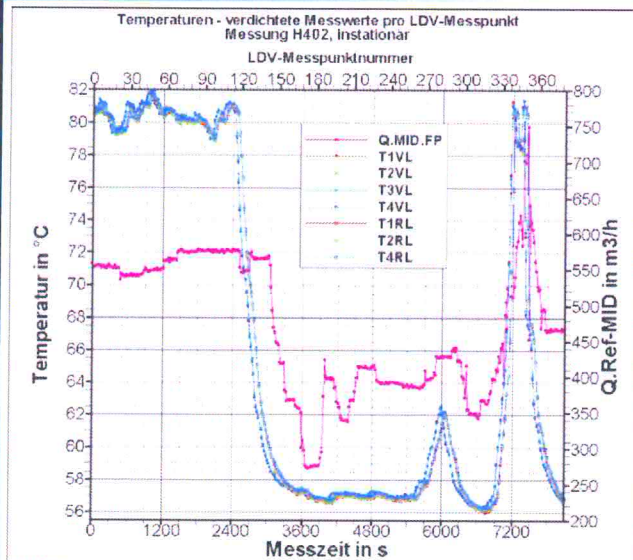
- Bezug Q.Ref-MID:
 - keine Veränderungen der Messunsicherheiten gegenüber 1. Messkampagne bei US-, MID- und Blenden-DFS
 - geringfügige tendenzielle Trift in den Minusbereich bei US-Clamp-on- und ANNUBAR-DFS
 - Wiederholungsicherheiten bei 4. Messkampagne unterhalb der Herstellerspezifikationen (ausser bei US-Clamp-on und ANNUBAR-DFS)
- Bezug Q.LDV:
 - Einfluss der veränderten MU für Q.LDV-Bestimmung bei Betriebspunkt 295 m³/h
 - ansonsten gleiche Aussagen wie oben

3.5 Temperaturmessungen

Anordnung von jeweils 4 Pt100-Temperaturfühlern im Vor- und Rücklauf mit unterschiedlichen Messpositionen zur Untersuchung von Temperaturschichtungen

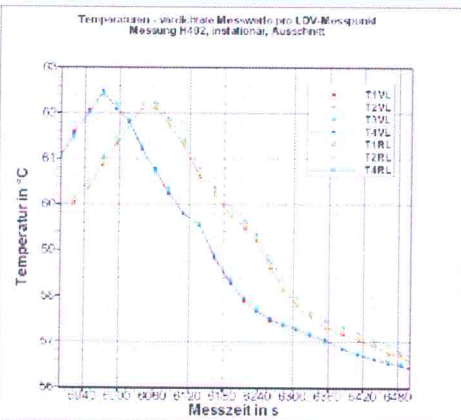


3.5 Temperaturmessungen Instationäre Betriebsfälle



Verdichtete Messwerte
(Mittelwerte während eines
LDV-Messpunktes)

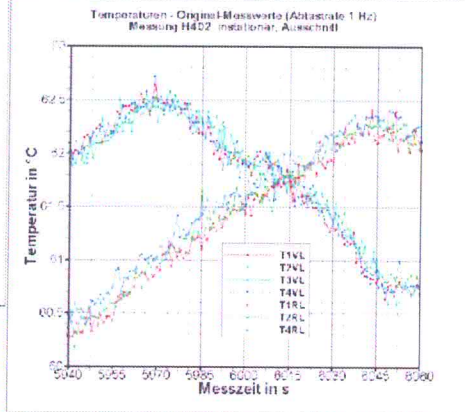
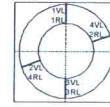
3.5 Temperaturmessungen Instationäre Betriebsfälle



Verdichtete Messwerte (Mittelwerte
während eines LDV-Messpunktes)

Zeitversatz zwischen VL- und RL-Messwerten: ca. 85 s
Rohrstrecke zwischen VL- und RL-Messort: ca. 70 m
Volumetrische Strömungsgeschwindigkeit: ca. 0,82 m/s

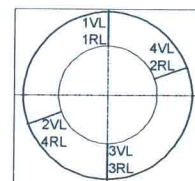
Tendenzen:
 $T1VL \approx T2VL \approx T3VL \approx T4VL$
 $T4RL > T2RL > T1RL$



Unverdichtete Messwerte (Abtastrate 1 Hz)

3.5 Temperaturmessungen Zusammenfassung

- die auftretenden Temperaturdifferenzen sind gering:
 - Vorlauf: Differenzen bei unterschiedlichen Eintauchtiefen $< 0,05$ K
 - Rücklauf: $T4RL - T2RL = 0,1$ K
 $T2RL - T1RL = 0,05 \dots 0,1$ K
- Vermutung der Ausbildung einer Kernströmung mit leicht höheren Temperaturen nach der Strömungsberuhigung in der geraden Rohrschleife
- die auftretenden Zeitverschiebungen zwischen Vorlauf- und Rücklauf-Temperaturen bei zeitlich veränderlichen Fluidtemperaturen sind nachvollziehbar und plausibel
- die Messstelle T3RL ist noch mit erhöhten Schwankungen beaufschlagt => ?
- Ist die Empfindlichkeit der heutigen Signalverarbeitung ausreichend?



Tendenzen:
 $T1VL \approx T2VL \approx T3VL \approx T4VL$
 $T4RL > T2RL > T1RL$

4. Ausblick

- Untersuchung unterschiedlicher Möglichkeiten zur Kontrolle/Überwachung der DFS:
 - LDV als Kontrollnormal
 - LDV-Netzmessung an vielen Punkten im Messquerschnitt (ohne Vorinformationen, zeitaufwendig (\Rightarrow nachts), beliebige Strömungszustände, hochgenau)
 - LDV-Messungen an ausgewählten Punkten im Messquerschnitt (Genauigkeit von Qualität der Vorinformationen abhängig) \Rightarrow geringe Messzeiten und Monitoring der DFS möglich
 - Package-MID als Gebrauchsnormal
 - Periodische Kalibrierung mittels LDV
 - Monitoring der DFS ohne LDV
- Fortsetzung periodischer Messkampagnen zur Überwachung der Messunsicherheit und Messstabilität der DFS unter verschiedenen Betriebsbedingungen
- Fortlaufende Optimierung der Messunsicherheiten des LDV-Systems (\Rightarrow ca. 0,2 %)
- Rückführung von Messtechnik und Package bei der PTB Berlin
- Bauartzulassung durch PTB (?)
- Erweiterungs-/Ausbau-Möglichkeiten der Versuchsanlage:
 - Einbau weiterer DFS (andere DN, neue Bauarten und gebrauchte DFS)
 - Vereinfachter Ein-/Ausbau der DFS
 - Einsatz für Ringvergleiche und DFS-Tests (z. B. ähnlich AGFW-Abnutzungsversuch)
 - ...

31

5. Zusammenfassung

- Wichtige Fortschritte bei der Weiterentwicklung der LDV-Messtechnik zur Volumenstrommessung unter Praxisbedingungen (Fernwärme, kleiner \pm 0,5 % Messunsicherheiten)
- Verfügbarkeit eines rückgeführten Messverfahrens und einer Versuchsanlage zur Überprüfung der Messrichtigkeit von installierten Durchfluss-Sensoren (DFS) grosser Nennweite unter Betriebsbedingungen
- Potenzial der vorgestellten LDV-Messtechnologie für:
 - Realisierung kompakter, industrienaher LDV-Volumenstrom-Messtechnik
 - Weitere Verringerung der Messunsicherheiten im vorgestellten praxisnahen Anwendungsfall
 - Weiterentwicklung zum Kontrollnormal für Prüfstände (hohe T, grosse Q)
 - Einsatz für hohe Prozessparameter (p, T und Q) und andere Medien

32