

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

DLR – IB – 325 – 04 – 08

**Kalibrierungsversuche einer Messblende
mittels Viertelkreisdüsen und Corioliszähler**

Interner Bericht

G. Stockhausen, M. Beversdorff

Institutsleiter:
Prof. Dr.-Ing. R. Mönig

Bearbeiter:
Dr.-rer.nat. G. Stockhausen

Köln-Porz, Februar 2008

INHALT

1. Einleitung	S. 3
2. Vergleich Messblende – Viertelkreisdüsen	S.4
3. Vergleich Messblende – Corioliszähler	S.8
4. Diskussion der Ergebnisse	S.12
5. Folgerungen	S.16
Literatur	S.17
Anhang Kalibrierprotokoll Corioliszähler	

Kalibrierungsversuche einer Messblende mittels Viertelkreisdüsen und Corioliszähler

1.) Einleitung

Zur Durchführung von Einlaufmessungen wurde 2005 im Auftrag von EADS ein Versuchsstand im Keller des Gebäudes 42 auf dem DLR-Gelände in Köln-Porz ausgelegt und aufgebaut [1]. Dieser besteht aus einer geraden Rohrstrecke, die mit einer Absaugeleitung mit den Niederdruckmaschinen der DLR-Verdichterzentrale verbunden ist. In diese Rohrstrecke wurde eine Massenstrom-Normblende eingebaut, die für Massenströme zwischen 0,5-1,5 kg/s nach DIN-EN-ISO-5167-2[2] ausgelegt ist.

Es wurde anschließend die Druckverteilung in der A.I.P. eines vorhandenen Einlaufmodells mittels der konventionellen Sondentechnik und der laseroptischen DGV-Methode vermessen und die Ergebnisse miteinander verglichen [3]. Dabei zeigte sich, dass die genaue und verlässliche Kenntnis des Massenstromes für einen quantitativen Vergleich der mit den verschiedenen Verfahren gewonnenen Daten unverzichtbar ist. Daher wurde die Entscheidung getroffen, die Norm-Blende einer zusätzlichen Kalibrierung mit geeigneten Viertelkreisdüsen zu unterziehen. Als Grundlage diente dabei der Bericht von Schodl und Unger [9], welcher den Einsatz einer Viertelkreisdüse unter ähnlichen Bedingungen beschreibt. Dieser Bericht gibt die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse der Kalibrierungsversuche wieder.

2.) Vergleich Messblende – Viertelkreisdüsen

Es wurden 3 Viertelkreisdüsen nach den VDI/VDE-Richtlinien [4] ausgelegt und gefertigt:

VKD1: nom. 600g/s, $d_1=56,89\text{mm}$, $r_1=5.83\text{mm}$

VKD2: nom. 1000g/s, $d_2=73,44\text{mm}$, $r_2=8.09\text{mm}$

VKD3: nom. 1400g/s, $d_3=86,90\text{mm}$, $r_3=10.30\text{mm}$

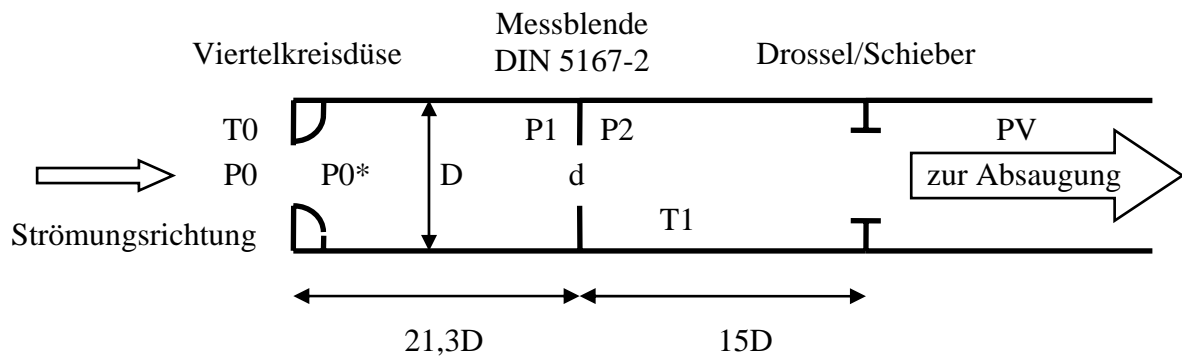
Als erste Versuchreihe wurden die Viertelkreisdüsen nacheinander an die Rohrstrecke angeflanscht und der resultierende Massenstrom bei kritischem Betrieb mit dem gemessenen Wert der Normblende verglichen:



Abb.1 Rohrstrecke mit Messblende (vorne) und Drosselschieber (hinten)



Abb.2 Installation einer der Viertelkreisdüsen



Rohrinnendurchmesser $D=203,4\text{mm}$
 Blendendurchmesser $d=125,0\text{mm}$
 $d/D = 0,615$

Abb.3 Prinzipieller Aufbau mit Viertelkreisdüse

Detailergebnisse einer VKD-Kalibrierung nach Abb.3:

Messung mit VKD ausgelegt für 600g/s ($d'=56,9\text{mm}$):

$P_0=1001\text{mbar}$, $P_0^*=418\text{mbar}$

$T_0=285\text{K}$, $T_1=285\text{K}$

$P_1=477\text{mbar}$, $P_2=384\text{mbar}$, $P_V=286\text{mbar}$

Blenden-Massenstrom= 563g/s

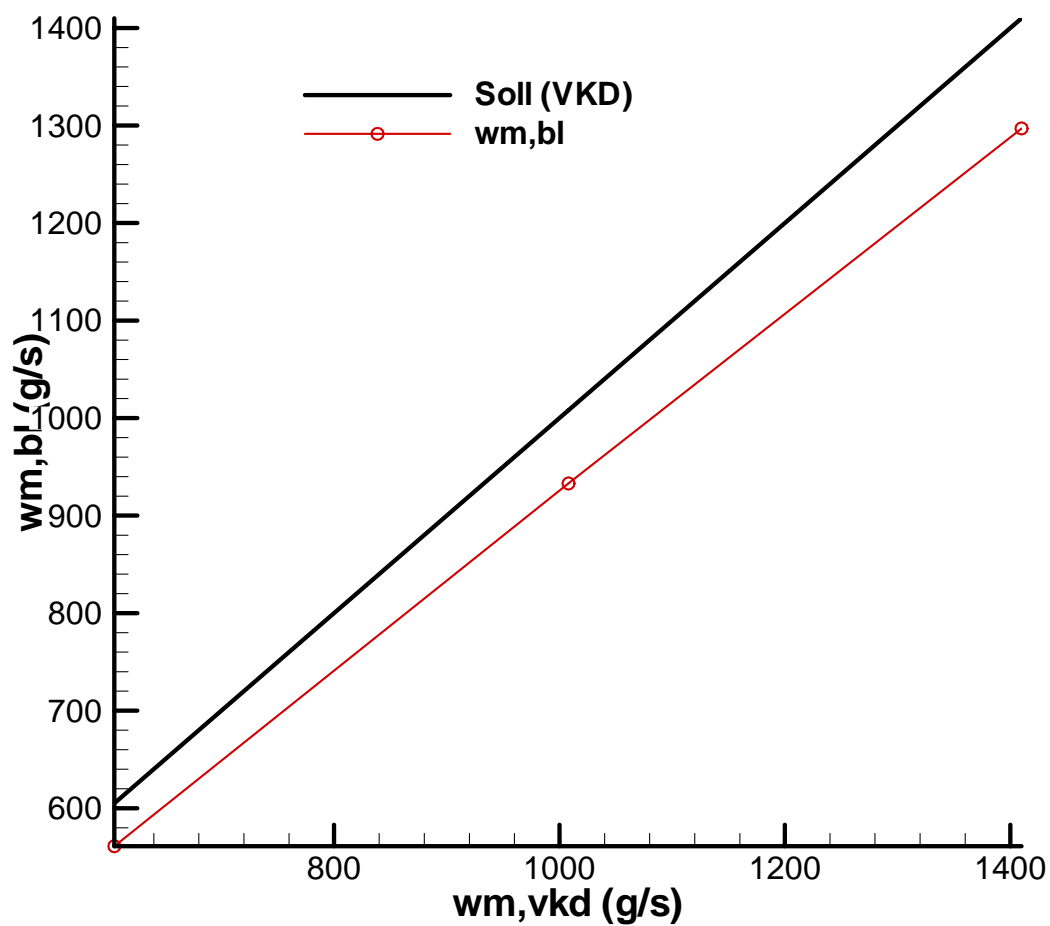


Abb. 5 Ergebnisse der VKD-Messungen

Es zeigt sich, dass der Messwert der Blende um ca. 7% kleiner ist, als der theoretisch zu erwartende Wert nach der Auslegungsgleichung für eine ideale isentrope Strömung:

$\text{krit. Massenstrom} = \text{krit. Dichte} \cdot \text{Schallgeschw.} \cdot \text{Düsenhalsfläche}$

Dieses unerwartete Ergebnis führte zu der Entscheidung, die Normblende zusätzlich mit einem kalibrierten Corioliszähler zu vergleichen.

3.) Vergleich Messblende – Corioliszähler

Zum Einsatz dieser Versuche kam ein Corioliszähler CMF 300A. Das zugehörige Kalibrierprotokoll befindet sich im Anhang und weist einen relativen Fehler von ca. 1.1% im realisierten Massenstrombereich von 400-600g/s aus. Höhere Massenströme können bei Absaugung gegen Atmosphäre nicht erreicht werden, da der Corioliszähler aufgrund seiner limitierten Halsfläche bei etwa 590g/s kritisch durchströmt wird.



Abb. 6 Aufbau des Corioliszählers CMF 300A an der Rohrstrecke



Abb.7 Bedien- und Anzeigeelektronik (Micro Motion)

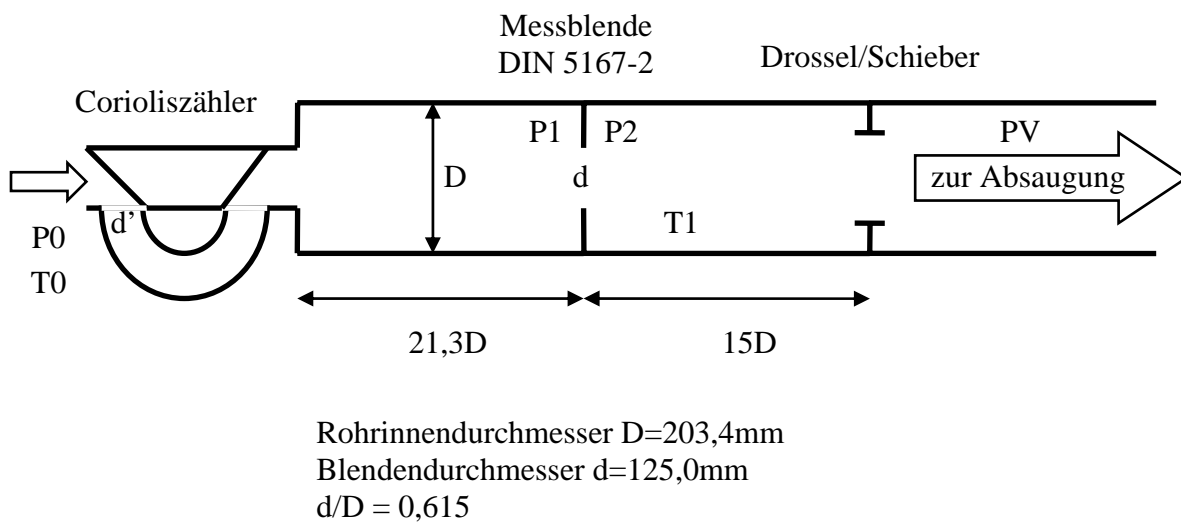


Abb.8 Prinzipieller Aufbau mit Corioliszähler

Detailergebnisse einer VKD-Kalibrierung nach Abb.8:

a) Messung mit COR (kritisch durchströmt):

$P_0=1000\text{mbar}$,

$T_0=285\text{K}$, $T_1=285\text{K}$

$P_1=439\text{mbar}$, $P_2=384\text{mbar}$, $P_V=389\text{mbar}$

Blenden-Massenstrom= 585g/s

Corioliszähler= 580g/s

b) Messung mit COR (Drossel kritisch durchströmt):

$P_0=1000\text{mbar}$,

$T_0=285\text{K}$, $T_1=285\text{K}$

$P_1=824\text{mbar}$, $P_2=804\text{mbar}$, $P_V=379\text{mbar}$

Blenden-Massenstrom= 492g/s

Corioliszähler= 490g/s

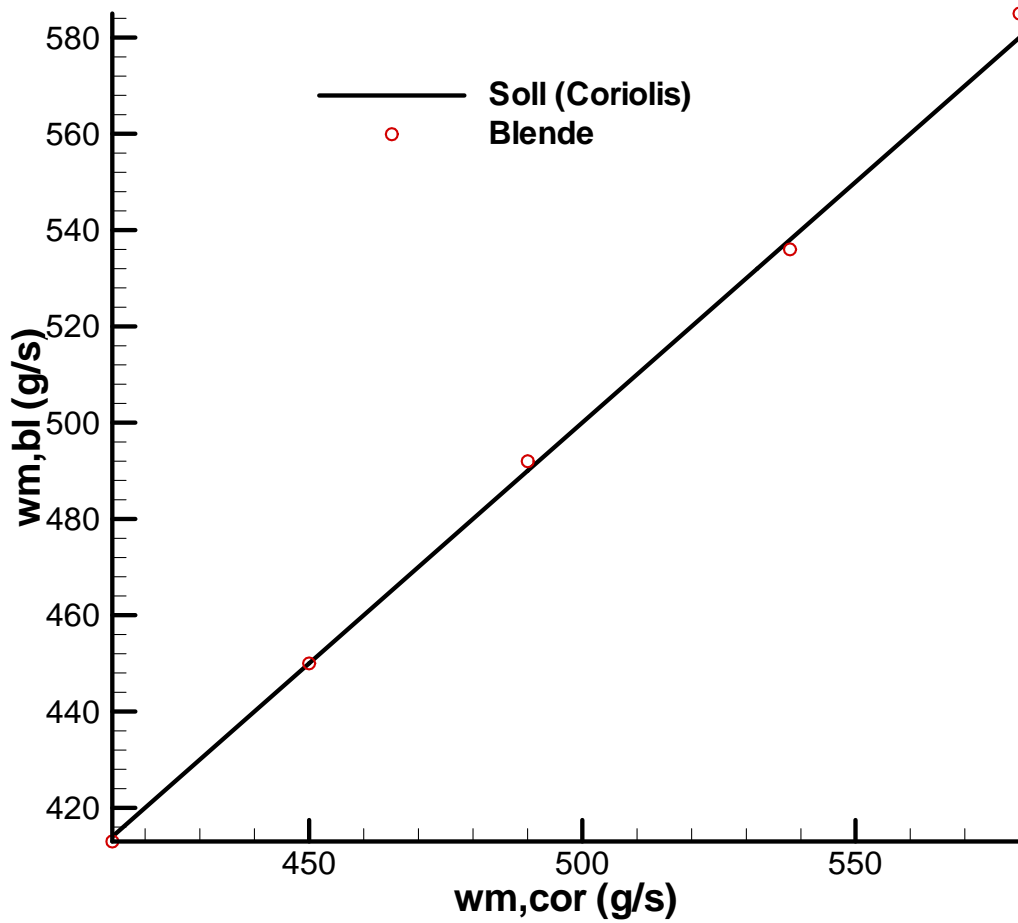


Abb. 9 Ergebnisse der Corioliszähler-Messungen

Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Corioliszähler und Normblende im Bereich von 400-600g/s unabhängig davon, ob der Corioliszähler oder die Drossel kritisch durchströmt wird.

4.) Diskussion der Ergebnisse

Um die Ursache für die Abweichungen der VKD-Versuchen zu finden, wurden folgende Maßnahmen durchgeführt:

- a) Alle eingesetzten Druckaufnehmer wurden neu kalibriert.
- b) Es wurde eine Temperaturmessung mittels eines kalibrierten PT-100 im Abstand von 5D hinter der Messblende eingebaut, um eventuelle Temperatureffekte aufzudecken.
- c) Die Rohrstrecke wurde auf 700mbar evakuiert bei geschlossenem Drosselschieber und abgedichteter Öffnung. Der Dichtigkeitstest ergab einen Druckverlust von 1Pa/s.
- d) Die Messblende wurde ausgebaut, vermessen, gereinigt und mit neuen Dichtungen versehen.
- e) Der Druckabfall über die Blende wurde mit einem kalibrierten Handgerät DPI-740 direkt an den Druckentnahmestellen nachgemessen.
- f) In der Messwerterfassung wurden Schläuche und Druckaufnehmer ausgetauscht.
- g) Es wurde ein Strömungs-Gleichrichter (Honeycomb, 5mm Dicke) hinter die Viertelkreisdüse in die Rohrleitung eingebaut.

Alle diese Maßnahmen brachten keine Veränderung im gemessenen Blenden-Massenstrom.

Ferner wurde eine weitere Viertelkreisdüse gebaut, welche mit einem Durchmesser von 51,95mm einen nominellen Massenstrom von 500g/s liefern sollte. Damit kann ein gleichzeitiger Betrieb von Corioliszähler und kritisch durchströmter VKD realisiert werden. Allerdings zeigte die Einbau-Kombination VKD unmittelbar vor dem Corioliszähler ein starkes Schwingungsverhalten, so dass mit dieser Reihenfolge keine stabile Messung möglich war. Auf den Einbau dieser Düse zwischen Corioliszähler und Messblende wurde verzichtet, da dafür aufwändige mechanische Adaptionen notwendig gewesen wären.

Da kein einziger Hinweis auf eine fehlerhafte Blendenmessung vorliegt, kommt nur noch die Viertelkreisdüse selbst als Ursache für die Abweichungen in Frage.

Eine intensive Literaturrecherche ergab dabei folgendes:

Zitat: „But in a real situation, the measured mass flow rate of the sonic nozzle at the given conditions is smaller than the theoretical one-dimensional isentropic flow rate. Consequently, the discharge coefficient is below one.“ [7]

„...a critical nozzle has to be calibrated in advance to obtain its discharge coefficient to correct error of the theoretical flow rate...“ [9]

Viertelkreisdüsen sind geeignet für Strömungen mit kleinen Reynoldszahlen (<10000), da sie in diesem Bereich im Gegensatz zu den meisten anderen Düsenformen einen nahezu konstanten Durchflusskoeffizienten aufweisen [5]. Je nach Durchmesser Verhältnis (Düse/Rohr) kann sich dieser Bereich bis ca. $Re=250000$ erweitern.

Beim Betrachten der Gleichung für den kritischen Massenstrom einer Viertelkreisdüse fällt auf, dass der in der Literatur übliche Durchflusskoeffizient fehlt (bzw. den Wert 1 hat), welcher die Abweichung des realen Düsenverhaltens gegenüber dem theoretischen beschreibt.

Die VDI/VDE 2041 Schrift, Kapitel 4 gibt eine Gleichung zur Berechnung dieses Koeffizienten an, die auf einen in der Tabelle 2 angegebenen Gültigkeitsbereich bezüglich Durchmesser Verhältnis und Reynoldszahl beschränkt ist:

$$C=0.769+0.527*\beta^4+0.423*\beta^8$$

Dabei wird ferner davon ausgegangen, dass als Einlaufbedingung stromauf der Düse eine gerade Rohrstrecke von $10D$ verwendet wird. Die Absaugung soll dann aus einem Großraum geschehen, damit ein Rechteck-Profil als Einströmbedingung realisiert werden kann.

Die angegebenen Werte für das Durchmesser Verhältnis beziehen sich auf genau diesen Einlauf-Rohrdurchmesser.

Würde man die Rohrstrecke stromauf der VKD mit dem gleichen Durchmesser wie stromab der VKD verlängern, so ergeben sich folgende Durchmesser Verhältnisse:

$$\beta_1 = 0.28, \beta_2 = 0.36, \beta_3 = 0.42$$

Die abgeschätzten Reynoldszahlen bezogen auf den Rohrdurchmesser für die erreichbaren 3 Massenströme sind:

$$Re_1 = 195000, Re_2 = 325000, Re_3 = 450000$$

Die Gültigkeitsbereiche für die Durchflusskoeffizienten einer Viertelkreisdüse kann man aus Tabelle 2, Kap.4.5 der VDI/VDE 2041 entnehmen. Obwohl im einleitenden Text der Bereich des zulässigen Durchmesser Verhältnisses β mit $0,2 < \beta < 0,6$ angegeben wird, bezieht sich Tabelle 2 auf die Quadrate von β :

$$\beta_1^2 = 0.0784, \beta_2^2 = 0.1296, \beta_3^2 = 0.1764$$

Die zulässigen Reynoldszahlen für die 3 verwendeten Viertelkreisdüsen sind damit:

$$Re_{1,max} = 70000, Re_{2,max} = 100000, Re_{3,max} = 160000$$

Damit sind die Gültigkeitsbereiche für die Berechnung des Durchflusskoeffizienten nach obiger Formel grob verletzt!

Im sich anschließenden Kapitel 5 der VDI/VDE 2041 wird der Fall einer Düse am Anfang einer Rohrstrecke (also ohne zusätzliches Einlaufstück) beschrieben. Unter Abschnitt 5.2.2 wird die zulässige Düsenform beschrieben, welche sich auf die ISA-1932-Düse (DIN 1952) bezieht. Für diese Düse kann man einen Durchflusskoeffizienten von 0.992 annehmen.

Es konnte in der Literatur kein Hinweis gefunden werden, wie der Durchflusskoeffizient für Viertelkreisdüsen bei den vorliegenden

Durchmesserverhältnissen und Reynoldszahlen berechnet werden kann. Eine allgemein gehaltene Vorgehensweise zur theoretischen Berechnung des Durchflusskoeffizienten bei kritischer Düsenströmung findet sich in [6]. Die wichtige Voraussetzung für die Gültigkeit der Berechnung ist die Annahme einer laminaren Grenzschicht im Düsenhals, welche für Venturidüsen erfüllt ist. Details für den Einsatz von Viertelkreisdüsen im Reynoldszahlbereich < 100000 finden sich in [10]. Nach [11] ist zu erwarten, dass im Reynoldszahlbereich > 100000 der Durchflusskoeffizient eine schwache Abnahme zeigt. Es werden allerdings auch hier keine expliziten Werte genannt. Weitere Details zur Auslegung kritischer Düsen finden sich in [12]. Die dort gezeigten Durchflusszahlen sind allerdings für Halsweiten zwischen 0.25-2.4mm bestimmt worden und somit für die in dieser Untersuchung verwendeten Durchmesser nicht geeignet.

5.)Folgerungen

Der Kalibrierungsversuch einer Normblende mittels dafür ausgelegten Viertelkreisdüsen konnte nicht erfolgreich durchgeführt werden, da die Durchflusskoeffizienten der VKD falsch angenommen wurden und tatsächlich unbekannt sind.

Generell können Viertelkreisdüsen in dem hier vorliegenden Reynoldszahlbereich (>250000) nicht als Vergleichsmethode ohne eigene Kalibrierung zur Bestimmung des Durchflusskoeffizienten benutzt werden.

Für eine korrekte Kalibrierung sollten kritisch betriebene Venturidüsen oder ISA-1932-Normdüsen verwendet werden, da hier die Durchflusskoeffizienten vermessen und damit bekannt sind.

Der Vergleich der Massenströme gemessen mit Normblende und Corioliszähler erbrachte eine gute Übereinstimmung (ca.1%) im Bereich von 400-600g/s. Die zusätzlich durchgeführten Prüfungen aller eingesetzten Komponenten erbrachten keinen Hinweis auf eine fehlerhafte Massenstrombestimmung mittels der Normblende.

Daher wird der Massenstrom der Normblende als richtig angenommen und kann in den weiteren Versuchen als Referenz verwendet werden.

Literatur:

- [1] „Aufbau eines Versuchsstandes zur aerodynamischen Vermessung der A.I.P. in einem vorhandenen Einlaufmodell“, DLR-IB-325-17-05, T. Dabrock, E. Nicke, 2005
- [2] „Durchflussmessungen von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt“, DIN-EN-ISO 5167, Teil 1-4, 2003
- [3] „Abschlussbericht der Phase IV: Durchführung von Versuchen zur aerodynamischen Vermessung der A.I.P. in einem vorhandenen Einlaufmodell“, DLR-IB-325-14-06, G. Stockhausen et. al., 2006
- [4] „Durchflussmessung mit Drosselgeräten: Blenden und Düsen für besondere Anwendungen“, VDI/VDE 2041, 1991
- [5] „Flow Measurement Engineering Handbook“, Richard Walter Miller, Mac Graw-Hill-Professional, ISBN 0070423660
- [6] „Discharge Coefficients of Critical Venturi Nozzles for CO₂ and SF₆“, Shin-ichi Nakao, Masaki Takamoto, Transactions of ASME, Vol.122, 730-734, December 2000
- [7] „Interference effects of three sonic nozzles of different throat diameters in the same meter tube“, Yong Moon Choi et al, Flow Measurement and Instrumentation 10 (1999), 175-181
- [8] „Methods to calibrate a critical nozzle and flowmeter using reference critical nozzles“, Masahiro Ishibashi, Masaki Takamoto, Flow Measurement and Instrumentation 11 (2000), 293-303
- [9] „Bericht über Zusatzversuche zum gekrümmten Einlauf (M 1:9,91) im Standfall als Ergänzung zu den Versuchen der PhaseII“, R.Schodl, W.Unger, Februar1997
- [10] „New data for the quadrant-edge orifice“, C. Britton, S. Stark, Int. Symp. On fluid flow measurements, 16.11.1986

[11] „Refining Discharge factor for Perforation on Perforated Pipes”,
Rouhollah Fatahi Nafchi, Ph.D thesis, University of Budapest, 1999

[12] „Mengenmessen mit kritisch durchströmten Düsen”, W.
Möllenbruck, Technisches Messen 48.Jg. 1981, Heft 9, V12-5