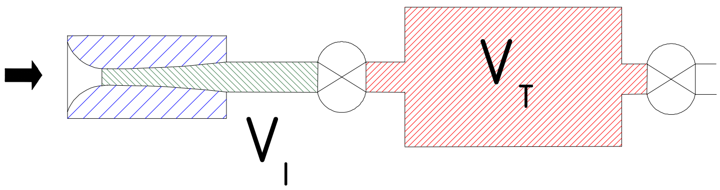
PVTt-Meßunsicherheitsbudget
für den Betrieb von Laval-Düsen an einem isothermen Tank mit Luft

1 Grundlegende Betrachtungen zur PVTt-Methode



Ein Luftvolumenstrom Q_v mit atmosphärischen Eingangsbedingungen (P_0, T_0, Rh_0) wird durch eine Laval-Düse frei angesaugt. Die Ansaugung wird durch die Aufschalten eines Tank-Trennventils vor einem evakuierten isothermen Tank ingang gesetzt, der unterhalb des kritischen Druckverhältnisses evakuiert ist, und nach Ablauf der Messzeit wieder beendet. Die Bestimmung des während der Messzeit in den Tank geströmten Massestromes Q_m erfolgt durch Vergleich der End- ρ (P_2, T_2, Rh_2) und Start-Dichte ρ (P_1, T_1, Rh_1) in dem isothermen Tankvolumen.

Die fundamentalen Beziehungen lauten für den Massenstrom als Differenz der Massen m_i in dem Messintervall t_1, t_2:

$$Q_m = \frac{(m_{2,T} - m_{1,T}) + (m_{2,I} - m_{1,I})}{t_2 - t_1} \qquad (1)$$

und in jedem Volumensegment V_i für die Dichte ρ_i, die mit der Zustandsgleichung des realen Gases im isothermen Zustand bestimmt ist:

$$\rho_i = \frac{P_i \cdot M}{Z \cdot R \cdot T_i} = \frac{m_i}{V_i} \qquad (2)$$

Vorausgesetzt es bleibt die Masse erhalten, der Zustand bleibt isotherm und es findet keine Volumenänderungen statt, lässt sich damit schreiben:

$$Q_m = \frac{V_T(\rho_{2,T} - \rho_{1,T}) + V_I(\rho_{2,I} - \rho_{1,I})}{t_2 - t_1} \qquad (3)$$

Im isothermen Tank und dem zusätzlichen Anschlussvolumen ist durch die reale Zustandsgleichung zu jedem Zeitpunkt der Zusammenhang zwischen den veränderlichen Grössen m_i , P_i und T_i gegeben. Wählt man die Bedingungen für die Messung so, dass in beiden Volumenteilen zum Start und Ende der Messung die gleiche Dichte herrscht, vereinfacht sich obige Gleichung zu:

$$Q_m = \frac{(V_T + V_I)(\rho_2 - \rho_1)}{t_2 - t_1} \qquad (4)$$

Die Dichteänderung, die ein zufliessender Massenstrom unter isothermen Bedingungen bewirkt, lässt sich aus der Zustandsgleichung ableiten, indem man sie nach dem Druck auflöst:

$$V \cdot P = Z \cdot R_s \cdot m \cdot T \qquad (5)$$

Abgeleitet nach der Zeit folgt daraus:

$$V \cdot \frac{dP}{dt} = Z \cdot R_s \cdot Q_m \cdot T + Z \cdot R_s \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} \qquad (6)$$

Bleibt der Zustand isotherm folgt der Druck im Tank direkt dem Massenstrom und der Temperatureinfluss spielt nur im Rahmen der Messunsicherheitsbetrachtung eine Rolle.

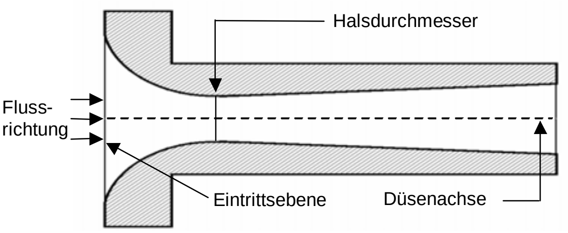
TetraTec Instruments GmbH
Gewerbestr. 8, 71144 Steinenbronn
Tel.: 07157 / 5387-0, Fax: 07157 / 5387-10
http://www.tetratec.de

Der Massenstrom Q_m berechnet sich nach dem Kontinuitätsgesetz und dem Gesetz der Massenerhaltung als das Produkt aus aktuellem Volumenstrom und Dichte bzw. Normvolumenstrom und Normdichte und ist an jeder Stelle im Rohrsystems gleich:

$$Q_m = Q_v * \rho = Q_{v,N} * \rho_N \qquad (7)$$

Mit dieser Beziehung lassen sich die Ergebnisse der Massenstrombestimmung durch den isothermen Tank auf andere Messstellen im Messaufbau umrechnen.

2 Grundlegende Betrachtungen zum Verhalten der Laval-Düse



Laval- oder Venturidüsen sind als Volumen- oder Massestromstellglied in Kalibrieranwendungen weit verbreitet. Durch ihre besondere Bauform mit Einlauftrichter und Auslaufdiffusor ermöglichen Sie eine nahezu ideale Strömungsführung, die Strahleinschnürung und Reibungsverluste minimiert. Optimale freie und ungestörte Anströmung liegt bei Vorliegen von “Großraumeigenschaften” im Eingangsbereich der Düse vor, wenn keine Wand der Düsenachse und der Eintrittsebene näher als das 5-fache des Halsdurchmessers kommt. Entsprechend dem absoluten Druckverhältnis von Ausgang zu Eingang unterscheidet man die überkritische und unterkritische Betriebsart der Düse. Im kritischen Betrieb kann aus Kontinuitätsgründen an der engsten Stelle im Halsteil die Schallgeschwindigkeit nicht überschritten werden. Entsprechend geht der Düseneingangs-Volumenstrom in ein Maximum. Ausgehend von der Theorie der reibungsfreien, isentropen, eindimensionalen und kompressiblen Düsenströmung, lässt sich das prinzipielle Durchlassverhalten einer Düse nach der Ableitung von Saint-Venant und Wenzel mit dem folgenden Ansatz für den theoretischen Massenstrom $Q_{m0,th}$ mit der Halsfläche A und der Ausflussfunktion ψ beschreiben:

$$Q_{m0,th} = A \cdot \sqrt{2\rho_0 \cdot P_0} \cdot \psi \qquad (8)$$

Das kritische Druckverhältnis wird erreicht bei einem Druck P^* im Hals an der engsten Stelle, der bei einem Diffusor-Ausgangsdruck P erreicht wird:

$$\left(\frac{P^*}{P_0}\right)_{krit} \leq \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \leq \left(\frac{P}{P_0}\right)_{krit} \qquad (9)$$

Bei dem kritischen Druckverhältnis wird jede Bohrung überkritisch und für Luft mit κ=1,41 ist dies ca. 0,528. Bei Lavaldüsen mit Ausgangsdiffusor findet eine Druckrückgewinnung statt und das kritische Druckverhältnis kann grösser werden bis zu 0,9. Im kritischen Betrieb erreicht die Ausflussfunktion ihr Maximum:

$$\psi_{max} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \qquad (10)$$

Im unterkritischen Bereich ist die isentrope Ausflussfunktion definiert bis zum Druckverhältnis von 1,

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1} \cdot \left[\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}\right]} \qquad (11)$$

wobei κ der Isentropenexponent als Verhältnis der isobaren zur isochoren Wärmekapazität definiert ist. Es gilt für die Schallgeschwindigkeit c unter adiabatischen, isentropen Bedingungen:

TetraTec Instruments GmbH
Gewerbestr. 8, 71144 Steinenbronn
Tel.: 07157 / 5387-0, Fax: 07157 / 5387-10
http://www.tetratec.de

$$c = \sqrt{\kappa \cdot R/_M \cdot T} = \sqrt{\kappa \cdot R_S \cdot T} = \sqrt{\kappa \cdot P/_\rho} \tag{12}$$

Formt man den theoretischen Massenstrom $Q_{m0,th}$ im kritischen Zustand durch Einsetzen der idealen Zustandsgleichung um, lässt er sich auch wie folgt schreiben:

$$Q_{m0,th} = A \cdot C^* \cdot \frac{P_0}{\sqrt{R_S \cdot T_0}} = A \cdot \rho_0 \cdot C^* \cdot \sqrt{R_S \cdot T_0} \tag{13}$$

wobei sich die ideale, maximale kritische Durchflussfunktion C^* schreiben lässt als:

$$C^* = \sqrt{2} \cdot \psi_{max} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} = \sqrt{\kappa \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \tag{14}$$

Wählt man als Referenzbedingungen am Eingang der Düse, die Auslegungsbedingungen oder die Normbedingungen der ISO erhält man zu beliebig anderen Eingangs-Messbedingungen P_0 und T_0 den theoretische Massestrom $Q_{m,th}$ zu

$$Q_{m,th} = Q_{m,iso,th} \cdot \frac{P_0}{P_{iso}} \cdot \sqrt{\frac{T_{iso}}{T_0}} = A \cdot \rho_{iso} \cdot C^* \cdot \sqrt{R_S \cdot T_{iso}} \cdot \frac{P_0}{P_{iso}} \cdot \sqrt{\frac{T_{iso}}{T_0}} \tag{15}$$

Berücksichtigt man nun auch Reibungs- und Realgaseffekte, die sich in der unterschiedlichen Dicke der ruhenden Randschicht des strömenden Mediums an der Düse je nach herrschender Dichte bemerkbar machen und dadurch den „freien Halsquerschnitt“ verändern, durch den Durchflusskoeffizienten C_d , der als Quotient von gemessenen Massenstrom Q_m und theoretischen (idealem) Massenstrom $Q_{m,th}$ definiert ist:

$$C_d = \frac{Q_m}{Q_{m,th}} = Q_m / (A \cdot \rho_{iso} \cdot C^* \cdot \sqrt{R_S \cdot T_{iso}} \cdot \frac{P_0}{P_{iso}} \cdot \sqrt{\frac{T_{iso}}{T_0}}) \tag{16}$$

erhält man durch umformen und zusammenfassen den gesamten Durchflusskoeffizienten C

$$C = C_d \cdot C^* \cdot A \cdot \frac{\sqrt{R_S \cdot T_{iso}}}{P_{iso}} \tag{17}$$

und die Form für den Massenstrom nach ISO 6358 für den kritischen Strömungszustand der Lavaldüse bezogen auf die Eingangs-Messbedingungen P_0 und T_0:

$$Q_{m,max} = C \cdot \rho_{iso} \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{T_{iso}}{T_0}} \tag{18}$$

Nach einem von der PTB empfohlenen Ansatz lässt sich der Einfluss der Luftfeuchte auf die Dichte und die Schallgeschwindigkeit der Luft beschreiben. Die Dichte nimmt mit zunehmender Feuchte ab und die Schallgeschwindigkeitwegen durch Abnahme der molaren Masse und dadurch Zunahme der spezifischen Gaskonstante zu. Die Korrektur des Einflusses auf den Durchflusskoeffizienten C wird mit einem zum molaren Wasseranteil proportionalen Faktor (1 – 0,209 x_v) angesetzt, der das Verhältnis des trockenen zum feuchten Düsen-Massenstrom beschreibt. Damit lässt sich für den zusammengefassten Durchflusskoeffizienten C und seiner Druck- und Feuchteabhängigkeit schreiben:

$$C = C_d \cdot C^* \cdot (1 + C_p \cdot (P_0 - P_{iso})) \cdot (1 - 0{,}209 \cdot x_v) \cdot A \cdot \frac{\sqrt{R_S \cdot T_{iso}}}{P_{iso}} \tag{19}$$

C_d und C_p sind dabei Konstanten, die bei der Kalibrierung einer Düse bestimmt werden können.
Ausserdem sind in der Norm EN ISO 9300 Ansätze zur Beschreibung von C_d für verschiedene Düsenformen angegeben, die auf Strömungs- und Geometriedaten beruhen.

TetraTec Instruments GmbH
Gewerbestr. 8, 71144 Steinenbronn
Tel.: 07157 / 5387-0, Fax: 07157 / 5387-10
http://www.tetratec.de

Analog zu (18) lässt sich die Gleichung für den Massenstrom im unterkritischen Strömungszustand durch Erweiterung mit der allgemeinen Ausflussfunktion aufstellen:

$$Q_m = C \cdot \rho_{iso} \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{T_{iso}}{T_0}} \cdot \frac{\psi}{\psi_{max}} = C \cdot \rho_{iso} \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{T_{iso}}{T_0}} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{-1}{\kappa-1}} \cdot \left[\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}\right]} \qquad (20)$$

Sie wird näherungsweise beschrieben durch eine Ellipsengleichung und lässt sich damit schreiben als:

$$Q_m = C \cdot \rho_{iso} \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{T_{iso}}{T_0}} \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{\left(\frac{P}{P_0}\right) - b}{1-b}\right]^2} = C \cdot \rho_{iso} \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{T_{iso}}{T_0}} \cdot F\left(\frac{P}{P_0}\right) \qquad (21)$$

Dabei steht b für das kritischen Druckverhältnis:

$$b = \left(\frac{P_{krit}}{P_0}\right) \qquad (22)$$

Der Druckkoeffizient $F(P/P_0)$ lässt sich im allgemeinen auch als Funktion des Differenzdruckes DP = P_0 – P und des Eingangsdruckes P_0 darstellen.

Vergleicht man die Gleichung für den Massenstrom im unterkritischen Strömungszustand aus der idealen isentropen Strömungstheorie mit dem Ansatz für den Massenstrom von Wirkdruckelementen nach DIN ISO 5167 für kompressible Medien unter Berücksichtigung von Reibungs-, Realgas- und Expansionseffekten, kann man für die druckabhängigen Koeffizienten messbare Zusammenhänge bzgl. Eingangsdruck (Eingangsdichte) und Differenzdruck aufstellen:

$$Q_m = \alpha_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot DP_0 \cdot \rho_0} = C_0 \cdot \rho_{iso} \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{T_{iso}}{T_0}} \cdot \sqrt{\varepsilon_0^2 \cdot \frac{DP \cdot P_0}{P_0^2}} \qquad (23)$$

Darin sind α der Durchflusskoeffizient, der wie der Durchflusskoeffizient C aus der isentropen Düsentheorie Halsdurchmesserveränderungen bei verschiedenen Strömungsbedingungen beinhaltet, und ε die Expansionszahl, die Druckabhängigkeiten des Massenstroms expandierender, kompressibler Medien beschreibt. C_0(Re) wird nach Norm im allgemeinen bei höheren Drücken als Funktion der Reynoldszahl in einer Polynomentwicklung dargestellt. Unter atmosphärischen Eingangsdrücken ist es jedoch völlig ausreichend C_0(DP, P_0) als Funktion des Differenzdruckes DP und des Eingangsdruckes P_0 darzustellen. Auf die analoge Form wie (21) gebracht, ergibt sich:

$$Q_m = C_0 \cdot \rho_{iso} \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{T_{iso}}{T_0}} \cdot \sqrt{\varepsilon_0^2 \cdot \frac{DP_0}{P_0}} = C_0 \cdot \rho_{iso} \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{T_{iso}}{T_0}} \cdot \sqrt{\varepsilon_0^2 \cdot \left(1 - \frac{P_x}{P_0}\right)} \qquad (24)$$

Die Expansionszahl ε lässt sich in erster Näherung für bleibende Druckabfälle an Laval-Düsen mit der Buckingham-Form ausreichend genau als Funktion des Druckverhältnisses ansetzen:

$$\varepsilon_0^2 = \left(1 - f \cdot \frac{DP_0}{\kappa \cdot P_0}\right)^2 = \left(1 - \left(\frac{f}{\kappa} \cdot \left(1 - \frac{P_x}{P_0}\right)\right)\right)^2 = \left(1 - \frac{f}{\kappa} + \frac{f}{\kappa} \cdot \frac{P_x}{P_0}\right)^2 \qquad (25)$$

Die Konstante f hat die Form f=a*κ und kann durch Kalibrierung bei gleicher Reynoldszahl (konstanter Massenstrom unter verschiedenen Druckbedingungen) ermittelt werden. Geht man von isothermen Bedingungen und gleicher Reynoldszahl-Abhängigkeit des Durchflusskoeffizienten bei Atmosphäre und Eingangsdrücken im Vakuum aus, leitet sich daraus die Beziehung ab, wie sich die Eingangs- P_0 und Ausgangs- P_x bzw. Differenzdrücke DP_0 bei Betrachtung des gleichen Massestroms zu verschiedenen Eingangsbedingungen 1 und 2 verhalten sollten:

$$\left(1 - a \cdot \frac{DP_0}{P_0}\right)^2 \cdot \frac{DP_{01}}{P_{01}} = \left(1 - a \cdot \frac{DP_0}{P_0}\right)^2 \cdot \frac{DP_{02}}{P_{02}} = \left(1 - a \cdot \left(1 - \frac{P_{x1}}{P_{01}}\right)\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{P_{x1}}{P_{01}}\right) = \left(1 - a \cdot \left(1 - \frac{P_{x2}}{P_{02}}\right)\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{P_{x2}}{P_{02}}\right) \qquad (26)$$

TetraTec Instruments GmbH
Gewerbestr. 8, 71144 Steinenbronn
Tel.: 07157 / 5387-0, Fax: 07157 / 5387-10
http://www.tetratec.de

3 Leckagen im Meßaufbau

Im Vorfeld jeder Vergleichsmessung ist durch eine Dichtheitsprüfung (Druckabfallprüfung) sicherzustellen, daß der maximale Fehler durch Leckagen im Meßaufbau unterhalb eines festgelegten Wertes bleibt. Beträgt das Volumen des Meßaufbaus V, der Prüfdruck bei Dichtheitsprüfung p und der kleinste zu kalibrierende Durchfluß Q_{min} , so beträgt für eine Unsicherheit u_L der maximal zulässige Druckabfall im Meßaufbau

$$dp/dt \le u_L \cdot Q_{min} \cdot p / V \tag{27}$$

Die Unsicherheit durch Leckagen darf in keinem Fall $u_L = 0{,}1\%$ überschreiten!

4 Meßunsicherheiten bei Vermessungen von Laval-Düsen am isothermen Tank:

Die Auswirkung der Fehlerfortpflanzung durch die relative Meßunsicherheit der einzelnen Meßgrößen wird nach ISO/TR 5168 durch die Standardabweichung ermittelt. Sie entspricht dem Intervall, in dem der Meßwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,3% liegt.

$$u_{ges}^2 = \sum_i u_i^2 \tag{28}$$

Die erweiterte Meßunsicherheit, die sich aus der relativen Standardmeßunsicherheit u_{ges} durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor k = 2 ergibt, entspricht dem Intervall, in dem der Meßwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% liegt. Sie wird durch die Kalibrierung mit einem Vergleichsnormal in einer auf die Physikalisch-Technische Bundesanstalt rückführbaren Meßkette festgelegt. Neben der Meßunsicherheit des Prüflings, der sich aus der Messkette ergibt, ist in ein zusätzlicher Beitrag zu berücksichtigen, der die Streuungen des Prüflings, bzw. der Kalibrierergebnisse beschreibt.

Ausschlaggebend für die Meßunsicherheit der Vermessung ist zunächst die Unsicherheit bei der Bestimmung des Massenstroms am isothermen Tank. Hinzu kommen die Unsicherheiten durch Leckagen und ggf. vernachlässigtes Realgasverhalten am isothermen Tank und auf das Durchflussverhalten der Laval-Düse.

Die Bestimmung des Massenstroms am isothermen Tank erfolgt nach der Gleichung:

$$Q_m = \frac{V}{Z \cdot R_s \cdot T} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{P \cdot V}{Z \cdot R_s \cdot T^2} \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{m}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{m}{T} \cdot \frac{dT}{dt} \tag{29}$$

Für diesen ergibt sich der folgende Ansatz für die Standardabweichung:

$$\frac{u(Q_m)_{ges}^2}{Q_m^2} = \frac{u(P)^2}{P^2} + \frac{u(T)^2}{T^2} + \frac{u(dt)^2}{dt^2} + \frac{u(V)^2}{V^2} + \frac{u(Z)^2}{Z^2} + \frac{u(R_s)^2}{R_s^2} \tag{30}$$

Die Fertigungstoleranzen der Laval-Düsen in der Halsfläche A und dem Auslaufdiffusor, die sich vor allem in dem Durchflusskoeffizienten C und dem Druckkoeffizienten $F(P/P_0)$ bemerkbar machen, sind mit der Messung über den isothermen Tank bestenfalls mit der Genauigkeit bestimmbar, wie der Durchflusskoeffizient C_d selbst bestimmt ist:

$$C_d = \frac{Q_m}{Q_{m,th}} = \frac{Q_m}{A \cdot C^* \cdot P_0 \cdot (Z \cdot R_S \cdot T_0)^{-0,5} \cdot (1 + C_p \cdot (P_0 - P_{iso})) \cdot (1 - 0{,}209 \cdot \chi_v) \cdot F(\frac{P}{P_0})} \tag{31}$$

Dies ergibt den folgenden Ansatz für die Standardabweichungvon C_d, wobei sich der isentrope Durchflusskoeffizient C^* vor allem im kritischen Bereich und der Druckkoeffizient $F(P/P_0)$ sich im unterkritischen Bereich auswirkt:

$$\frac{u(C_d)_{ges}^2}{C_d^2} = \frac{u(Q_m)^2}{Q_m^2} + \frac{u(P_0)^2}{P_0^2} + \frac{u(C^*(\kappa_0))^2}{C^{*2}} + \frac{u(Z)^2}{4 \cdot Z^2} + \frac{u(R_s)_{ges}^2}{4 \cdot R_s^2} + \frac{u(T_0)^2}{4 \cdot T_0^2} + \frac{u(C_p(P_0))^2}{C_p(P_0)^2} + \frac{u(C_d(x_v))^2}{C_d(x_v)^2} + \frac{u(F(\frac{P}{P_0}))^2}{F(\frac{P}{P_0})^2} \tag{32}$$

TetraTec Instruments GmbH
Gewerbestr. 8, 71144 Steinenbronn
Tel.: 07157 / 5387-0, Fax: 07157 / 5387-10
http://www.tetratec.de

Die Messunsicherheit setzt sich also insgesamt aus folgenden Faktoren zusammen:

Messunsicherheitsbestimmung **PVTt - Isothermer Tank**

Messunsicherheitsanteil	Einheit	Bezugswert	Abs. Unsicherheit	Rel. Unsicherheit	Gewichtung
Druck	mbar	600	0,2	0,03333%	1
Temperatur	K	293,15	0,2	0,06822%	1
Zeit	s	2	0,001	0,05000%	1
Volumen	ml	1000	0,1	0,01000%	1
Realgasfaktor	-	0,999545	0,00016	0,01601%	1
Universelle Gaskonstante	J/(kmol K)	8314,47	0,01662894	0,00020%	1
Molare Masse	kg/kmol	28,9639	0,0007241	0,00250%	1
Leckage				0,10000%	1
Massenstrom	kg/s			0,13649%	

Cd - Lavaldüse **kritscher Betrieb**

Messunsicherheitsanteil	Einheit	Bezugswert	Abs. Unsicherheit	Rel. Unsicherheit	Gewichtung
Massenstrom	kg/s			0,13649%	1
Druck	mbar	900	0,2	0,02222%	1
Temperatur	K	293,15	0,2	0,06822%	1,25
Rel. Feuchte	%RH	100	3	3,00000%	0,000081
Cd(P)	-	1	0,0001	0,01000%	1
Cd(Xv)	-	1	0,0016	0,16000%	1
Isentropenexponent k	-	1,41	0,01	0,70922%	0,25
$F(P/P_0)$	-	1	0,05	5,00000%	0
Realgasfaktor	-	0,999545	0,00015993	0,01600%	0,25
Universelle Gaskonstante	J/(kmol K)	8314,47	0,01662894	0,00020%	0,25
Molare Masse	kg/kmol	28,9639	0,0007241	0,00250%	0,25
Rechenfehler		1	0,002	0,20000%	1
Leckage				0,10000%	1
Unsicherheit in Cd				0,47664%	

Cd - Lavaldüse **unterkritscher Betrieb**

Messunsicherheitsanteil	Einheit	Bezugswert	Abs. Unsicherheit	Rel. Unsicherheit	Gewichtung
Massenstrom	kg/s			0,13649%	1
Druck	mbar	900	0,2	0,02222%	1
Temperatur	K	293,15	0,2	0,06822%	1,25
Rel. Feuchte	%RH	100	3	3,00000%	0,000081
Cd(P)	-	1	0,0001	0,01000%	1
Cd(Xv)	-	1	0,0016	0,16000%	1
Isentropenexponent k	-	1,41	0,01	0,70922%	0,25
$F(P/P_0)$	-	1	0,005	0,50000%	1
Realgasfaktor	-	0,999545	0,00015993	0,01600%	0,25
Universelle Gaskonstante	J/(kmol K)	8314,47	0,01662894	0,00020%	0,25
Molare Masse	kg/kmol	28,9639	0,0007241	0,00250%	0,25
Rechenfehler		1	0,002	0,20000%	1
Leckage				0,10000%	1
Unsicherheit in Cd				0,69078%	

TetraTec Instruments GmbH
Gewerbestr. 8, 71144 Steinenbronn
Tel.: 07157 / 5387-0, Fax: 07157 / 5387-10
http://www.tetratec.de