

PTB-Prüfregeln

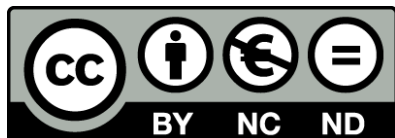
Band 25

Meßgeräte für Gas

– Prüfstände mit kritisch betriebenen Düsen –

Diese elektronische Version der PTB-Prüfregel Band 25 ist durch Digitalisierung der 1998 erschienenen Druckversion erzeugt worden. Die folgenden Seiten sind Bilddateien.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt und unterliegt der Creative Commons Nutzerlizenz CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Empfohlene Zitierweise:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Meßgeräte für Gas – Prüfstände mit kritisch betriebenen Düsen [online]. 1. Auflage 1998. Bearbeitet von Gudrun Wendt, Harald Dietrich, Bernhardt Jarosch, Reiner Joest, Burger Nath, Franz Frössl und Martin Ruwe. Braunschweig, © 1998, digitalisiert 2020. PTB-Prüfregeln, Band 25. ISSN 0341-7964.

Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/510.20200811F>

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon:(05 31) 592-93 13

Telefax:(05 31) 592-92 92

www.ptb.de

PTB-Prüfregeln

Band 25

Meßgeräte für Gas

– Prüfstände mit kritisch betriebenen Düsen –

Bearbeitet von Dipl.-Phys. Gudrun Wendt
 Dipl.-Ing. Harald Dietrich
 Dipl.-Ing. Bernhardt Jarosch
 Dipl.-Phys. Reiner Joest
 Dr. Burger Nath
 Franz Frössl
 Dipl.-Ing. Martin Ruwe

Herausgegeben von der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)
in Zusammenarbeit mit den Eichaufsichtsbehörden

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin ISSN 0341-7964

Die PTB-Prüfregeln sollen als Unterlage und Richtlinie für die Prüfung von Meßgeräten und Betriebsmitteln dienen. Den wesentlichen Teil einer Prüfregel bildet demnach die ausführliche Beschreibung der Prüfverfahren, der benötigten Normalgeräte und anderer Prüfmittel. Soweit es zum besseren Verständnis nützlich erscheint, wird auch auf die Ausführung der Gerätearten und auf Besonderheiten, die bei ihrer Anwendung zu beachten sind, eingegangen. Das Gebiet der PTB-Prüfregeln umfaßt nicht nur die eich- und beglaubigungsfähigen Meßgeräte, sondern auch Meßgeräte und Objekte anderer Art, die im Bereich der PTB geprüft werden. Die Prüfregeln wenden sich sowohl an die Eichbehörden, staatlich anerkannten Prüfstellen und Überwachungsorgane als auch an die Prüflaboratorien von Industrie und Wirtschaft. Sie werden ferner für die Einrichtung von Prüfstellen und Meßräumen sowie für Lehrzwecke von Nutzen sein.

Schriftleitung: Dipl.-Phys. H. Klages
 Physikalische-Technische Bundesanstalt
 Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig

PTB-Prüfregeln Band 25

Alle Rechte vorbehalten
© 1998 by Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
Druck: Heckner Druck- und Verlags-GmbH & Co. KG, 38285 Wolfenbüttel

Inhaltsverzeichnis

	Vorbemerkungen	
1	Durchflußmessung von Gasen mit kritisch betriebenen Düsen	1
1.1	Physikalische Grundlagen einer kritischen Düsenströmung	1
1.2	Düsenformen	3
1.3	Handhabung und Material	5
1.4	Kritisches Druckverhältnis	5
1.5	Meßbereich	8
2	Anforderungen an Prüfräume und Prüfmittel	9
2.1	Prüfräume	9
2.2	Prüfmittel	9
3	Prüfung und Kennzeichnung kritischer Düsen als Normale	11
3.1	Allgemeines zum Ablauf der Prüfung	11
3.1.1	Prinzipieller Aufbau der Prüfanordnung	12
3.1.2	Besondere Anforderungen an Prüfräume und Prüfmittel	13
3.1.3	Vorbereitung der Prüfung	13
3.1.4	Prüfumfang	14
3.2	Arbeitsgleichungen für die Prüfung einer kritisch betriebenen Düse mit Hilfe eines Normalgaszählers	15
3.2.1	Ermittlung der Düsenkennzahl $Q_{v,20,tr}$ (1-Punkt-Prüfung)	16
3.2.2	Ermittlung der Düsenkennzahl $Q_{v,20,tr,1000}$ (2-Punkt-Prüfung)	18
3.2.3	Ermittlung des Massedurchflusses $Q_{m,20,tr}$ bzw. $Q_{m,20,tr,1000}$	19
3.3	Separate Prüfung von Einzeldüsen	20
3.4	Prüfung von Düsen im Einbauzustand	23
3.5	Kennzeichnung der Düsen	27
3.6	Prüfschein und Gültigkeitsdauer der Prüfung	28

4	Anforderungen an Düsenprüfstände	29
4.1	Hardware	29
4.2	Software	30
4.2.1	Zugangsberechtigungen	31
4.2.2	Anzeigepflicht bei Softwareänderungen	32
4.2.3	Kennzeichnung bei Änderung	33
4.2.4	Datensicherung	34
5	Konstruktive Gestaltung von Prüfständen	34
5.1	Auslegung der Düsen	34
5.2	Einbaubedingungen für die Komponenten	39
5.3	Gewährleistung der Dichtheit	42
5.4	Gestaltungsbeispiele	43
6	Abnahme und Überwachung	47
6.1	Vorbereitung der Abnahme	47
6.2	Abnahme	47
6.3	Überwachung	48
7	Verwendung kritischer Düsen als Normalgeräte	51
7.1	Arbeitsgleichungen	51
7.2	Berechnungsbeispiel	53
7.3	Betriebsweise	56
7.4	Durchführung der Dichtheitsprüfung	57
7.4.1	Äußere Dichtheit	57
7.4.2	Innere Dichtheit	60
8	Verwendete Formelzeichen	62
8.1	Für die theoretischen Beschreibungen in Kapitel 1	62
8.2	Für die Arbeitsgleichungen und Berechnungsbeispiele in den nachfolgenden Kapiteln	63

9	Literaturverzeichnis	67
----------	-----------------------------	-----------

Anhänge

A	Beispiel für die experimentelle Bestimmung des kritischen Druckverhältnisses einer Düse	68
B	Beispiel für die Berechnung der Meßunsicherheit der Düsenkennzahl $Q_{v, 20, tr}$ bei einer Prüfung im Einbauzustand	71
C	Algorithmus zur Berechnung der Geometrie einer kritischen Düse	79
D	Beispiel für die Durchführung der Dichtheitsprüfung mit Unterdruck	80

Vorbemerkungen

Für die meßtechnische Prüfung von Mengen- und Durchflußmeßgeräten für Gase gewinnt die Verwendung kritisch betriebener Düsen immer mehr an Bedeutung. Prüfstände mit kritischen Düsen als Normal (im weiteren Düsenprüfstände genannt) werden zunehmend auch für die Eichung bzw. Beglaubigung von Gaszählern eingesetzt, die im geschäftlichen Verkehr verwendet oder bereitgehalten werden und damit nach dem Eichgesetz [1] der Eichpflicht unterliegen. Der mit solchen Düsenprüfständen realisierte Durchflußmeßbereich erstreckt sich derzeit von 16 dm³/h als Q_{\min} -Prüfpunkt für den kleinsten zugelassenen Haushalts-Balgengaszähler G 1,6 bis zu einigen Tausend m³/h z. B. bei Turbinenrad- und Drehkolbengaszählern.

Die vorliegende Schrift behandelt Fragen des Einsatzes kritisch betriebener Düsen sowohl aus der Sicht des Entwicklers bzw. Herstellers von Düsenprüfständen wie auch des Anwenders (Eichbehörden der Länder, staatlich anerkannte Prüfstellen bei Meßgeräteherstellern und Gasversorgungsunternehmen). Sie umfaßt weitestgehend alle meß- und eichtechnisch relevanten Aspekte dieser Problematik. Dazu gehören eine kurze Darstellung der physikalischen Grundlagen kritischer Düsenströmungen, Bedingungen für die gerätetechnische Gestaltung der Prüfstände sowie Anforderungen an die Kalibrierung der Düsen, die Abnahme der Prüfstände und ihren Einsatz zur Eichung/Beglaubigung von Gasvolumenmeßgeräten. Außerdem werden an Hand von Ausführungsbeispielen einige Punkte der Prüfstandsgestaltung dargestellt, spezielle Prüfprozeduren beschrieben sowie entsprechende Berechnungsbeispiele angeführt.

Die in diesen Prüfregele formulierten Anforderungen sind für die Anwendung der Düsenprüfstände zur Eichung/Beglaubigung von im geschäftlichen Verkehr eingesetzten Meßgeräten verbindlich und ergänzen die PTB-Prüfregele Band 4, Volumengaszähler [2]. Sie befinden sich in Übereinstimmung mit den im ISO-Standard 9300 [3] getroffenen Festlegungen, die sich jedoch nur auf Düsengestaltung, -einbau und -koeffizientenberechnung erstrecken. Die vorliegenden Prüfregele gehen hinsichtlich des Durchflußmeßbereichs über den Rahmen dieses ISO-Standards hinaus und formulieren erstmals Anforderungen an den Einsatz kritisch betriebener Düsen aus der Sicht des gesetzlichen Meßwesens.

Die vorliegenden Prüfregele beschränken sich ausschließlich auf den Betrieb kritischer Düsen mit Luft unter Atmosphärenbedingungen.

1 Durchflußmessung von Gasen mit kritisch betriebenen Düsen

1.1 Physikalische Grundlagen einer kritischen Düsenströmung

Die Durchflußmessung von Gasen mit kritisch betriebenen Düsen ist ein spezieller Anwendungsfall der Durchflußmessung mit Drossелеlementen. Im Gegensatz zum Wirkdruckverfahren, bei dem der Druckabfall über der Drosselstelle als Maß für den Durchfluß dient, wird im Fall der kritisch betriebenen Düsen der Gasstrom soweit beschleunigt, daß er im engsten Düsenquerschnitt Schallgeschwindigkeit erreicht. Die Einstellung dieses kritischen Strömungszustandes bewirkt, daß der Durchfluß begrenzt wird und die nach dem engsten Querschnitt herrschenden Strömungsbedingungen die Zustände und das Erscheinungsbild der Strömung davor nicht mehr beeinflussen können. Hierin besteht der wesentlichste Unterschied zu den Wirkdruckverfahren, die entsprechend der möglichen Differenzdruckänderung in einem Durchflußbereich verwendet werden können, wohingegen mit einer kritisch betriebenen Düse bei festgelegten thermodynamischen Eingangsbedingungen jeweils nur ein Durchflußwert realisiert werden kann.¹

Als Ausgangsgleichungen für die Beschreibung und Berechnung kritischer Düsenströmungen werden verwendet²

$$\text{für den Volumendurchfluß} \quad Q_V = A_d \cdot c_* \cdot \sqrt{R \cdot T_0} \quad (1)$$

$$\text{für den Massedurchfluß} \quad Q_m = A_d \cdot c_* \cdot \frac{p_0}{\sqrt{R \cdot T_0}} \quad (2)$$

$$\text{mit der kritischen Strömungsfunktion} \quad c_* = \sqrt{\kappa} \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa+1}{2 \cdot (\kappa-1)}} \quad (3)$$

wobei diese Gleichungen für den Fall einer idealen Strömung (reibungsfrei, adiabat, eindimensional) gelten und p_0 und T_0 den Ruhezustand der Strömung vor der Düse

1 Eine Ausnahme hiervon bilden durchflußvariable Venturi-Düsen, wie sie in Abschnitt 1.2 beschrieben sind, die jedoch auf dem gleichen meßtechnischen Effekt beruhen, da die Durchflußänderung jeweils nur durch eine Änderung der Düsengeometrie erreicht werden kann.

2 Alle hier und im weiteren verwendeten Formelzeichen werden in Kapitel 8 erklärt.

charakterisieren. Für die Berücksichtigung der Effekte realer Gasströmungen wird in jede der Gleichungen ein Düsenbeiwert c eingeführt, der entweder aus Tabellenwerken entnommen oder experimentell bestimmt werden kann. Die oben aufgeführten Gleichungen nehmen somit folgende Form an:

$$\text{für den Volumendurchfluß} \quad Q_V = A_d \cdot c \cdot c_* \cdot \sqrt{R \cdot T_0} \quad (4)$$

$$\text{für den Massedurchfluß} \quad Q_m = A_d \cdot c \cdot c_* \cdot \frac{p_0}{\sqrt{R \cdot T_0}} \quad (5)$$

Für den praktischen Einsatz kritisch betriebener Düsen für die Gasdurchflußmessung sind einige Besonderheiten hervorzuheben, die sich aus den physikalischen Bedingungen einer kritischen Strömung ergeben. Sie betreffen insbesondere die Notwendigkeit, die vor der Düse herrschenden thermodynamischen Parameter Druck, Temperatur und relative Luftfeuchte in jedem Fall zu berücksichtigen, da der jeweils realisierte Durchfluß von diesen Parametern abhängig ist, und zwar

1. von der Temperatur, bedingt durch die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur

(Durchflußänderung um 0,17 % pro K)

2. von der Feuchte, bedingt durch eine Abhängigkeit des in die kritische Strömungsfunktion eingehenden Isentropenexponenten von der Feuchte

(Durchflußänderung um 0,23 % bei einer nicht berücksichtigten relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % – s. [4])

3. vom Eingangsdruck, bedingt durch die Abhängigkeit des Düsenbeiwertes von der Reynoldszahl, die ihrerseits von der Dichte und damit vom Eingangsabsolutdruck abhängt

(ist vor allem für Düsen mit Durchflüssen unter 1 m³/h wichtig, da dort auf Grund der kleinen Durchmesser Grenzschichteffekte eine deutliche Rolle spielen, die vorrangig für diese Abhängigkeit verantwortlich sind; in ungünstigen Fällen kann die Eingangsdruckabhängigkeit in Bereichen kleiner Reynoldszahlen mehr als 0,01% pro mbar betragen).

Diese zusätzlichen Abhängigkeiten können mathematisch sehr gut und zuverlässig beschrieben und bei den notwendigen praktischen Berechnungen berücksichtigt werden. In den Gleichungen (4) und (5) ist die Temperaturabhängigkeit durch den jeweiligen Wurzelausdruck aus der Ruhetemperatur T_0 berücksichtigt. Die Feuchteabhängigkeit ist in der kritischen Strömungsfunktion c_* nach Gleichung (3) enthalten.

Die Abhängigkeit vom Eingangsdruck wird über die Reynoldszahlabhängigkeit des Düsenbeiwertes $c = f(Re)$ beschrieben.

1.2 Düsenformen

Zur Realisierung des beschriebenen Durchflußmeßverfahrens werden Düsen spezieller Form verwendet. Hinsichtlich der geometrischen Gestaltung des inneren Strömungskanals kritisch betriebener Düsen gelten die Empfehlungen des ISO-Standards 9300 [3]. Bild 1 zeigt die Innengeometrie einer Venturi-Düse mit toroidalem Hals, Bild 2 die einer Venturi-Düse mit zylindrischem Hals.

Aus meßtechnischer Sicht sollte der toroidalen Form nach Bild 1 der Vorzug gegeben werden, da hier u. a. die Gefahr von fertigungsbedingten Vor- oder Rücksprüngen im Düsenhalsbereich und damit von unkontrollierbaren Strömungseffekten eher vermieden werden kann.

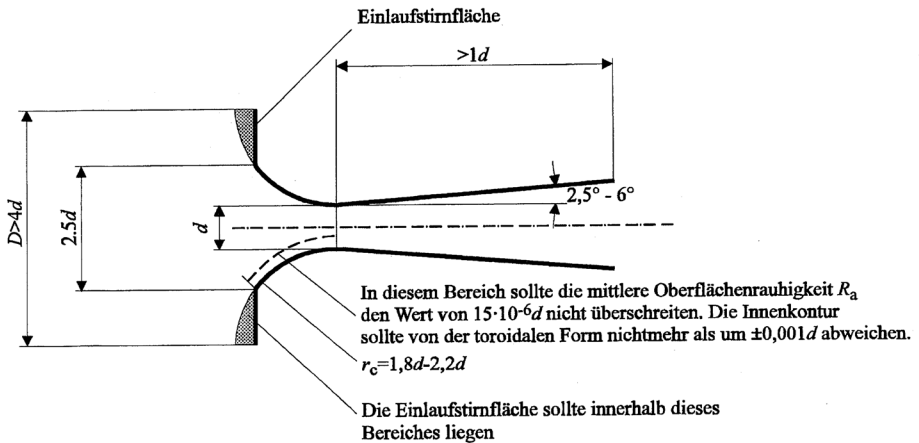


Bild 1: Venturi-Düse mit toroidalem Hals [3]

Auf der Basis der toroidalen Grundform können auch durchflußvariable Venturi-Düsen (s. Bild 3) hergestellt werden. Hierbei wird durch das Verschieben eines konischen Dorns (Düsennadel) innerhalb des Düsenhalses eine Veränderung des kritischen Strömungsquerschnittes erreicht. Der äußere Durchmesser des dadurch entstehenden Kreisringes ist ein fester Wert und wird durch die Düsenkontur an ihrer engsten Stelle

bestimmt, der innere Durchmesser ändert sich in Abhängigkeit von der Stellung des Dorns im Düsenhals. Dadurch sind unterschiedliche Volumendurchflüsse (im allgemeinen im Bereich 1:5 bis 1:8) stufenlos einstellbar. Die Reproduzierbarkeit der realisierbaren Durchflußwerte wird durch die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Düsenadelpositionierung bestimmt. Besondere Aufmerksamkeit ist auf eine schwingungsfreie Führung der Düsenadel zu richten.

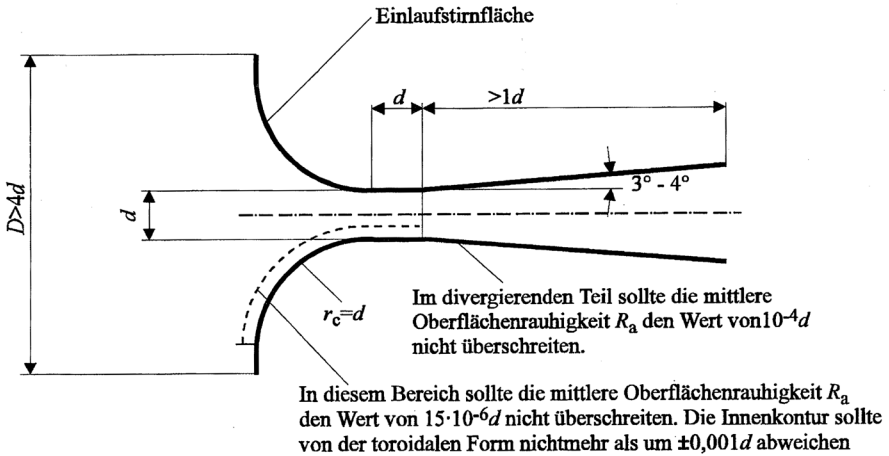


Bild 2: Venturi-Düse mit zylindrischem Hals [3]

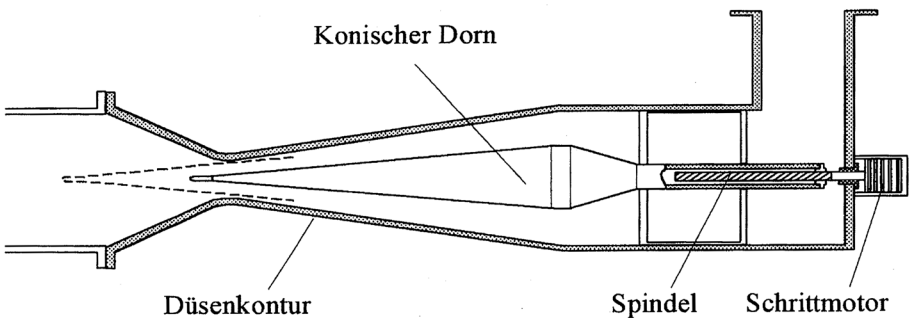


Bild 3: Schematische Darstellung einer durchflußvariablen Venturi-Düse

Andere Düsenformen sind nur dann zulässig, wenn alle meßtechnisch relevanten Parameter (Durchflußbeiwert, kritisches Druckverhältnis, ggf. Eingangsdruckabhängigkeit) für jede Düse durch individuelle Kalibrierung ermittelt werden. Es ist zulässig, Düsen aus mehreren, einzeln gefertigten Teilen zusammensetzen, wenn garantiert werden kann, daß keine Vor- oder Rücksprünge die Innenkontur der Düse geometrisch verändern und das meßtechnische Verhalten nachteilig beeinflussen.

1.3 Handhabung und Material

Düsen sind hochpräzise mechanische Geräte, die wie alle feinmechanischen Objekte der sorgfältigen Behandlung bedürfen.

Zu vermeiden ist die mechanische Berührung der Innenkontur der Düse, z. B. mit einem Meßschieber, durch Schmutzpartikel oder einwirkende Kräfte, die die Geometrie der Düse beeinflussen. Eine Verformung würde sofort eine unbestimmbare Veränderung der bei der Prüfung ermittelten Düsenparameter herbeiführen und eine Neuprüfung der Düse erfordern.

Kritische Düsen sind aus korrosionsbeständigen, verschleißfesten Materialien, vorzugsweise aus rostfreiem Chrom-Nickel-Stahl herzustellen.

1.4 Kritisches Druckverhältnis

Der kritische Strömungszustand in der Düse (die Gasströmung erreicht im kleinsten Düsenquerschnitt die örtliche Schallgeschwindigkeit) stellt sich ein, wenn das sogenannte kritische Druckverhältnis $(p_2/p_0)_{kr}$ zwischen dem Absolutdruck p_2 nach der Düse und dem Ruhedruck p_0 vor der Düse erreicht ist. Dieses Druckverhältnis, das verkürzt auch mit r_* bezeichnet wird, berechnet sich zu

$$\left(\frac{p_2}{p_0}\right)_{kr} = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \equiv r_* \quad (6)$$

Für Venturi-Düsen nach Bild 1 oder 2, deren Reynoldszahl Re_d im kleinsten Düsenquerschnitt größer als $2 \cdot 10^5$ und deren Auslaufkonus länger als der Düsendurchmesser d ist, kann das zum Erreichen des kritischen Strömungszustandes mindestens notwendige Druckverhältnis deutlich über diesem Wert liegen und nach folgender Beziehung ermittelt werden

$$\left(\frac{p_2}{p_0}\right)_{\max} = 0,8 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_0}\right)_i - r_{3e}\right] + r_{3e} \quad (7)$$

wobei der Wert $(p_2/p_0)_i$ aus den thermodynamischen Beziehungen einer idealen Gasströmung als Funktion des Flächenverhältnisses des divergierenden Düsenabschnittes (Diffusor) bestimmt werden kann. Die aktuellen Werte für $(p_2/p_0)_{\max}$ können Bild 4 entnommen werden (für Luft gilt $\kappa = 1,4$).

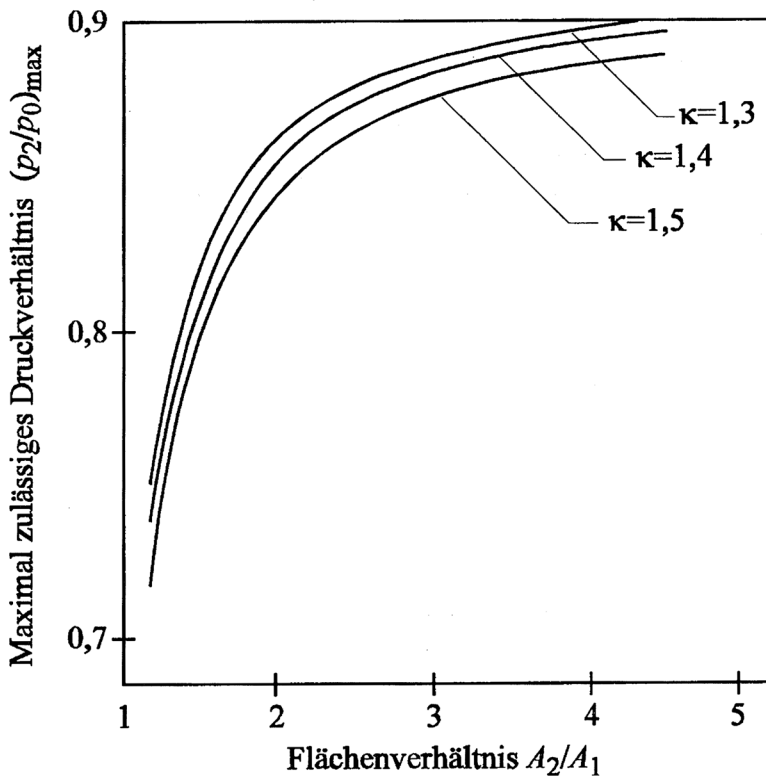


Bild 4: Maximal zulässiges Druckverhältnis für kritisch betriebene Venturi-Düsen [3]

Das in Bild 4 dargestellte Querschnittsflächenverhältnis (Diffusoraustrittsfläche zu Düsenhalsfläche) wird aus den geometrischen Parametern der Venturi-Düse wie folgt bestimmt:

a) für Venturi-Düsen mit toroidalem Hals³

$$\frac{A_2}{A_d} = \left[\frac{2 \cdot L_{\text{Diff}} \cdot \tan \alpha_{\text{Diff}}}{d} + \frac{2r_c}{d} \cdot (1 - \cos \alpha_{\text{Diff}}) + 1 \right]^2 \quad (8)$$

b) für Venturi-Düsen mit zylindrischem Hals

$$\frac{A_2}{A_d} = \left(\frac{2 \cdot L_{\text{Diff}} \cdot \tan \alpha_{\text{Diff}}}{d} + 1 \right)^2 \quad (9)$$

mit L_{Diff} Länge des divergierenden Teils (Diffusor)
 α_{Diff} Halbwinkel des divergierenden Teils.

Wird die genannte Untergrenze für die Reynoldszahl Re_d nicht eingehalten, werden andere Düsenformen verwendet, oder kann die geometrische Ausführung der Düsen nicht nachgeprüft werden, ist das maximal zulässige Druckverhältnis experimentell zu ermitteln bzw. zu überprüfen. Dazu ist der Druck stromabwärts der Düse solange zu variieren, bis der Volumendurchfluß durch die Düse konstant bleibt, d. h. Druckänderungen keine Änderungen des Durchflusses mehr bewirken. Ein Beispiel für eine solche Untersuchung ist in Anhang A beschrieben.

Der kritische Strömungszustand einer Düse wird also dann garantiert, wenn das maximal zulässige Druckverhältnis $(p_2/p_0)_{\text{max}}$ unterschritten wird. Dieser Zustand kann in zwei Betriebsarten realisiert werden

- a) im sogenannten Saugbetrieb durch Absenken des Druckes nach der Düse mittels einer Vakuumpumpe oder eines Unterdruckgebläses
- b) im Druckbetrieb durch Erhöhen des Druckes vor der Düse.

In der vorliegenden Prüffregel wird explizit meist nur auf den unter a) genannten Saugbetrieb eingegangen. Der Grund hierfür liegt vor allem darin, daß sich in der meßtechnischen Praxis vorrangig diese Betriebsweise durchgesetzt hat, da hierbei – im Gegensatz zum Druckbetrieb – keine speziellen Vorkehrungen zur Druck- und Temperaturstabilisierung der Strömung vor der Düse (bzw. auch im Eingang der gesamten Meßeinrichtung) erforderlich sind. Generell gilt, daß alle im weiteren aufgeführten Anforderungen grundsätzlich für beide Betriebsweisen gelten bzw., wenn erforderlich, sinngemäß auf den Fall des Druckbetriebes zu übertragen sind.

³ Die geometrischen Verhältnisse, die den Flächenberechnungen zugrunde liegen, sind in Abschnitt 5.1 nochmals ausführlicher dargelegt.

1.5 Meßbereich

Der gültige ISO-Standard 9300 [3] beschränkt sich derzeit auf einen Reynoldszahlbereich von

$$10^5 < Re_d < 10^7 \quad \text{für Düsen mit toroidalem Hals und}$$

$$3,5 \cdot 10^5 < Re_d < 2 \cdot 10^7 \quad \text{für Düsen mit zylindrischem Hals.}$$

Bei Einhaltung der in [3] geforderten Fertigungsqualität sowohl hinsichtlich der Formgebung der Düseninnenkontur als auch der Oberflächenrauigkeit können in den genannten Reynoldszahlbereichen für die Berechnung des Durchflusses nach den Gleichungen (4) und (5) die Düsenbeiwerte c nach der Gleichung

$$c = a - b \cdot Re_d^{-n} \quad (10)$$

berechnet werden, wobei die Werte für a , b und n der folgenden Tabelle 1 zu entnehmen sind:

Tabelle 1: Kennzahlen für die Berechnung der Düsenbeiwerte c

Venturi-Düse mit toroidalem Hals		Venturi-Düse mit zylindrischem Hals	
$10^5 < Re_d < 10^7$	$a = 0,993\ 5$ $b = 1,525\ 0$ $n = 0,5$	$3,5 \cdot 10^5 < Re_d < 2,6 \cdot 10^6$	$a = 0,988\ 7$ $b = n = 0$
		$2,6 \cdot 10^6 < Re_d < 2,0 \cdot 10^7$	$a = 1$ $b = 0,216\ 5$ $n = 0,2$

Die Meßunsicherheit der nach (10) berechneten Düsenbeiwerte beträgt 0,5 %.

Es ist möglich, kritische Düsen auch über die genannten Reynoldszahlbereiche hinaus einzusetzen. Dies betrifft insbesondere die Bereiche unterhalb der in [3] angegebenen minimalen Meßbereichsgrenze $Re_d = 10^5$, was einem Volumendurchfluß Q_V von etwa 33 m³/h für Luft bei Atmosphärenbedingungen entspricht. Die kleinsten gegenwärtig verwendeten kritischen Düsen haben einen Innendurchmesser von 0,17 mm und erzeugen einen Volumendurchfluß Q_V von ca. 15 dm³/h ($Re_d \approx 2 \cdot 10^3$).

Für alle Düsen mit $Re_d < 10^5$ ist eine individuelle Kalibrierung erforderlich. Das gleiche trifft zu, wenn Düsen mit einer höheren Meßgenauigkeit als mit den Tabellenwerten aus [3] von $\pm 0,5\%$ eingesetzt werden sollen, oder wenn die geforderten geometrischen und bearbeitungstechnischen Kenngrößen nicht eingehalten werden.

2 Anforderungen an Prüfräume und Prüfmittel

Für Prüfräume und Prüfmittel gelten die Anforderungen der Eichanweisung – Allgemeine Vorschriften – in der jeweils gültigen Fassung sowie die PTB-Prüfregeln „Volumengaszähler“.

Prüfmittel müssen von der PTB oder Eichbehörde anerkannt und amtlich geprüft sein. In den Prüfscheinen angegebene Meßabweichungen oder Korrekturen sowie Nachprüffristen sind zu berücksichtigen.

2.1 Prüfräume

Die Prüfräume sollen eine zeitlich und räumlich möglichst gleichmäßige Temperatur besitzen und dürfen aus dem Freien nicht direkt zugänglich sein. Tägliche Temperaturschwankungen dürfen nicht größer als 2 K sein. Die in der Nähe der Prüfstände gemessene Raumtemperatur darf sich um nicht mehr als 1 K/h ändern. Sonneneinstrahlung auf die Prüfstände und zu prüfenden Zähler muß ausgeschlossen sein.

2.2 Prüfmittel

Als Hilfsmeßgeräte werden die Aufnehmer einschließlich Anzeige (ggf. mit Signalverarbeitung) für Über- bzw. Differenzdruck, atmosphärischen Luftdruck, Zeit, Temperatur und Luftfeuchte verstanden.

Erstprüfungen sind jeweils von der zuständigen Eichbehörde bei der Abnahme der Prüfstände vorzunehmen. Regelmäßige Wiederholungsprüfungen der Hilfsmeßgeräte können der Prüfstelle bei Bedarf durch die Eichbehörde auferlegt werden. Empfohlen wird eine erste Nachprüfung nach spätestens zwei Jahren.

Diese und eventuell erforderliche Justierungen können auch von der Prüfstellenleitung vorgenommen werden, sofern dafür geeignete Prüfmittel vorhanden sind. Die Dokumentation hat im Prüfstandshandbuch zu erfolgen.

Im einzelnen handelt es sich um Hilfsmeßgeräte zur Messung der folgenden Meßgrößen:

Druck

Vorzugsweise sollten alle während der Messungen/Prüfungen erforderlichen bzw. für Berechnungen benötigten Drücke als Differenzdrücke auf einen Referenzwert bezogen werden, der als Absolutdruck gemessen wird. Dies kann der barometrische Druck oder einer der zu bestimmenden Absolutdrücke vor der Düse oder den Prüflingen sein.

Meßgeräte, die nur zur Überwachung des kritischen Druckverhältnisses oder der Dichtigkeit dienen, müssen nicht amtlich geprüft sein.

Luftdruck

Falls der Luftdruck ausschließlich zur Bestimmung des molaren Wasserdampfanteiles x_v verwendet wird, kann er mit einem Stationsbarometer ermittelt und als Festwert in den Rechner eingegeben werden. Bei Änderungen von mehr als 2 mbar ist dieser Wert zu korrigieren.

Zeit

In die Überprüfung der Zeiterfassung ist die gesamte Meßkette des Prüfstandes einschließlich der vorhandenen Software einzubeziehen. Die hier verwendeten Zeitmeßgeräte können anstelle einer amtlichen Prüfung über einen Zeitzeichenempfänger für den Sender DCF 77 verglichen werden.

Temperatur

Zur Messung der Temperatur sind vorzugsweise elektronische Aufnehmer vorzuziehen.

Feuchte der Prüfluft

Die Bestimmung der Feuchte der Prüfluft vor dem Eintritt in die Düse erfolgt entweder mit einem Meßgerät für den Taupunkt oder die relative Feuchte. Ist kein Online-Feuchteaufnehmer vorhanden, muß im Rechner ein Festwert vorgegeben sein. Dieser ist bei Änderungen der Luftfeuchte um mehr als 5 % zu korrigieren.

Die einzuhaltenen Mindestanforderungen hinsichtlich Teilung bzw. Auflösung A sowie der Meßunsicherheiten u sind in Tabelle 2 zusammengefaßt:

Tabelle 2: Mindestanforderungen an die einzelnen Meßgrößen

Meßgröße	separate Prüfung von Düsen als Normal	Verwendung und Prüfung von Düsen im Prüfstand
Druck	$A \leq 0,1 \text{ mbar}$ $u \leq 1 \text{ mbar}$	$A \leq 1 \text{ mbar}$ $u \leq 2 \text{ mbar}$
kritisches Druckverhältnis	$A \leq 10 \text{ mbar}$ $u \leq 10 \text{ mbar}$	$A \leq 10 \text{ mbar}$ $u \leq 10 \text{ mbar}$
Temperatur	$A \leq 0,01 \text{ K}$ $u \leq 0,1 \text{ K}$	$A \leq 0,1 \text{ K}$ $u \leq 0,2 \text{ K}$
Prüfluftfeuchte	$A \leq 1 \%$ $u \leq 10 \%$	$A \leq 5 \%$ $u \leq 10 \%$
Zeit	$A \leq 0,01 \text{ s}$ $u \leq 1 \cdot 10^{-4}$	$A \leq 0,01 \text{ s}$ $u \leq 2 \cdot 10^{-4}$

3 Prüfung und Kennzeichnung kritischer Düsen als Normale

3.1 Allgemeines zum Ablauf der Prüfung

Die Prüfung von kritisch betriebenen Düsen als Normale erfolgt im allgemeinen mit Hilfe von Volumenmeßeinrichtungen höherer Genauigkeit (Bezugsnormale der PTB, Kontrollnormalgeräte der Eichaufsichtsbehörden).

Dabei wird der Durchfluß durch die Düse, der bei überkritischem Druckverhältnis erreicht wird, durch Vergleich mit einem geeigneten Normal ermittelt und auf einen

festgelegten Zustand umgerechnet. Für diesen Bezugszustand gelten, wenn nicht anders vereinbart, 1000 mbar für den Düseneingangsdruck, 20 °C für die Düseneingangstemperatur und 0 % für die relative Feuchte der Prüfluft. Der so berechnete Durchflußwert wird Düsenkennzahl genannt.

Im Rahmen der Prüfung wird keine Überprüfung der Einhaltung der vorgegebenen Innenkontur oder der Fertigungsgüte der Düse durchgeführt. Auch der Öffnungsdurchmesser der Düse, der aufgrund der Auslegung für die Fertigung vorgegeben wurde, wird nicht nachgemessen.

3.1.1 Prinzipieller Aufbau der Prüfanordnung

Die Prüfung einer kritischen Düse erfolgt in der Regel in der in Bild 5 skizzierten Anordnung, die die grundsätzliche Zusammenschaltung von Düse und Normal zeigt.

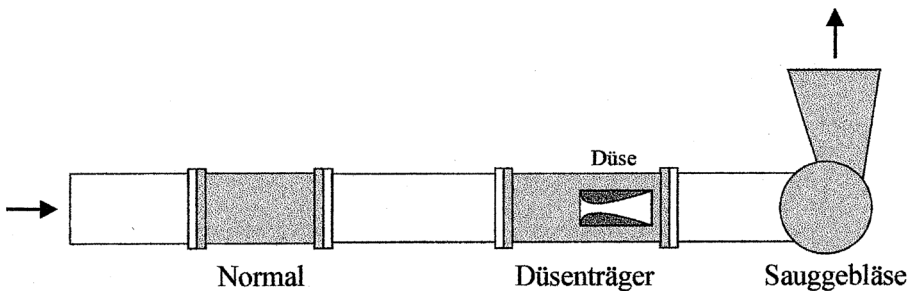


Bild 5: Prinzipielle Anordnung von zu prüfender Düse und Normal

Dabei sind zwei generell unterschiedliche Prüfanordnungen möglich. Die Düse kann entweder separat geprüft werden, wozu sie in eine spezielle Düsenaufnahmevorrichtung, die Dichtheit und korrekte Anströmverhältnisse entsprechend der späteren Verwendung im Prüfstand gewährleistet, installiert wird⁴.

Düsen können auch unmittelbar im Einbauzustand geprüft werden, indem der Prüfstand, in dem die Düsen verwendet werden sollen, direkt an das Normal angeschlossen wird.

4 Beispiele für den Einbau einer Düse in eine solche Aufnahmevorrichtung sind auch in Abschnitt 5.2 gezeigt, wo konkrete Hinweise zur konstruktiven Gestaltung von Düsenprüfständen gegeben sind.

3.1.2 Besondere Anforderungen an Prüfräume und Prüfmittel

Für Prüfräume gelten die in Abschnitt 2.1 genannten Anforderungen. Die Temperatur darf sich jedoch nicht mehr als 0,5 K je Stunde und nicht mehr als 0,3 K während eines Prüfanges ändern.

Für die Volumenbestimmung sind – je nach Nenndurchfluß der zu prüfenden Düsen – als Kontroll- oder Bezugsnormale geprüfte Kolbenmeßeinrichtungen, Meßglocken, Trommel-, Drehschleusen- oder Turbinenradgaszähler geeignet. Kolbenmeßeinrichtungen und Meßglocken müssen präzise Wegdifferenzmeßeinrichtungen aufweisen. Großgaszähler müssen mit NF- und/oder HF-Impulsgebern ausgestattet sein. An Trommelgaszählern sind Einrichtungen zur Erkennung voller Meßtrommelumdrehungen erforderlich. Bei der Verwendung von Drehkolbengaszählern ist auf ausreichende Dämpfungsmaßnahmen gemäß TR G 15 [5] zu achten.

Als weitere Prüfmittel und Prüfungshilfsmittel werden solche benötigt, die auch bei der Anwendung der Düsen in Prüfständen erforderlich und in Abschnitt 2.2 aufgeführt sind. Werden Kennzahlen von Düsen unabhängig von dem Prüfstand, für den sie vorgesehen sind, bestimmt, so gelten hinsichtlich der Genauigkeit der Prüfmittel höhere Anforderungen. Diese sind ebenfalls der Tabelle 2 in Abschnitt 2.2 zu entnehmen.

3.1.3 Vorbereitung der Prüfung

Die Temperatur der Düse (ggf. des Düsenprüfstandes) ist hinreichend an die des Normals anzupassen. Dies ist im allgemeinen gewährleistet, wenn sich Düse und Normal mindestens fünf Stunden im selben Raum befinden.

Zur Beseitigung von Ablagerungen von Fertigungsschmiermitteln oder ähnlichem an den strömungsrelevanten Oberflächen der Düse ist ein Vorlauf über mindestens zehn Minuten Dauer erforderlich. Dies ist insbesondere bei Düsen mit einem Öffnungsquerschnitt kleiner 2 mm unverzichtbar.

Die Dichtheit der Verbindung zwischen Normal und Düsenaufnahmeverrichtung bzw. Düsenprüfstand (äußere Dichtheit) – ggf. zusätzlich die Dichtheit von Parallelleitungen zueinander (innere Dichtheit) –, ist sicherzustellen.

3.1.4 Prüfumfang

1-Punkt-Prüfung

Für Düsen, die nur für die gerade herrschenden Atmosphärendruckbedingungen geprüft werden, sind mindestens drei Einzelmessungen erforderlich, die separat ausgewertet werden und aus denen ein Mittelwert für die gesuchte Düsenkennzahl bestimmt wird.

Diese Prüfung berücksichtigt nur die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur und der kritischen Strömungsfunktion von der Prüfluftfeuchte. Die Eingangsdruckabhängigkeit der Düsenkennzahl wird vernachlässigt. Ob diese Methode ausreicht, ist von der angestrebten Meßunsicherheit, der Düsengröße und vor allem der zu erwartenden Eingangsdruckspanne abhängig (s. auch Bemerkungen in Abschnitt 1.1).

Die zugehörigen Arbeitsgleichungen für die Auswertung der Einzelmessungen zur Berechnung der jeweiligen Düsenkennzahl sind in Abschnitt 3.2.1 zu finden.

2-Punkt-Prüfung

Hierbei werden alle Abhängigkeiten der Düsenkennzahl von den Zustandsparametern berücksichtigt, also auch die Eingangsdrucksabhängigkeit. Diese kann jedoch nur durch zusätzliche Messungen bei unterschiedlichen Eingangsdrücken ermittelt werden.

Ist die zu erwartende Eingangsdruckspanne bei der späteren Anwendung der Düse kleiner als 50 mbar, ist es in der Regel ausreichend, nur bei zwei verschiedenen Drücken zu messen und für diesen Bereich näherungsweise eine lineare Abhängigkeit der Düsenkennzahl vom Eingangsdruck anzunehmen.

Für eine solche 2-Punkt-Prüfung sind mindestens folgende Messungen in der nachstehenden Reihenfolge vorzunehmen, die einzeln auszuwerten und für die beiden Drücke jeweils zu mitteln sind:

- zwei Messungen bei Atmosphärendruckbedingungen
- zwei Messungen bei vermindertem Düseneingangsdruck (mindestens 50 mbar unter Atmosphärendruck)
- eine Wiederholungsmessung bei Atmosphärendruckbedingungen.

Weichen die Anfangs- und Wiederholungsmessungen bei Atmosphärendruckbedingungen um mehr als 0,05 % voneinander ab, ist die Ursache der Meßunsicherheit (z. B. Luftdruckschwankungen, unzureichende Einlaufdauer) zu ermitteln und entweder

durch den Austausch von Prüfmitteln oder Abwarten günstigerer Bedingungen zu beseitigen. Danach ist die gesamte Prüfung zu wiederholen.

Die zugehörigen Arbeitsgleichungen für die Auswertung der Einzelmessungen zur Berechnung der jeweiligen Düsenkennzahl sowie des Korrekturfaktors zur Berücksichtigung der Eingangsdruckabhängigkeit sind in Abschnitt 3.2.2 erläutert.

Für die spätere Anwendung der auf diese Weise 2-Punkt-geprüften Düsen ist neben der näherungsweise als linear vorausgesetzten Abhängigkeit der Düsenkennzahl vom Eingangsdruck, die für den tatsächlich geprüften Eingangsdruckbereich gilt, auch eine lineare Extrapolation für größere Düseneingangsdrücke zulässig, wenn diese im Bereich der normalen Luftdruckschwankungen liegen und auf Grund der aktuellen Bedingungen während der Prüfung selbst nicht erfaßt werden konnten.

Bei der Nachprüfung von 2-Punkt-geprüften Düsen nach Ablauf der bei der vorherigen Prüfung festgelegten Gültigkeitsdauer kann auf die neuerliche Bestimmung der Eingangsdruckabhängigkeit verzichtet und der entsprechende Wert aus dem vorherigen Prüfschein übernommen werden.

Bestimmung des Mindestdruckverhältnisses

Sowohl für die 1-Punkt- als auch die 2-Punkt-Prüfung kann auf Antrag ermittelt werden, bei welchem Mindestdruckverhältnis der kritische Strömungszustand erreicht wird. Der detaillierte Ablauf einer solchen Prüfung und ein ausführliches Zahlenbeispiel sind in Anhang A angeführt.

3.2 Arbeitsgleichungen für die Prüfung einer kritisch betriebenen Düse mit Hilfe eines Normalgaszählers

In diesem Abschnitt wird die Prüfung einer kritischen Düse mit Hilfe eines Normalgaszählers beschrieben. Die dabei zu verwendenden Arbeitsgleichungen werden aus Abschnitt 1.1 für die theoretische Erklärung einer kritischen Düsenströmung angegebenen Gleichungen abgeleitet, wobei jedoch anstelle der Ruhebedingungen des Gases für Druck p_0 und Temperatur T_0 hier näherungsweise die vor dem Düseneingang gemessenen Werte p_D und T_D benutzt werden.

Als Ergebnis der Prüfung wird für jede Düse eine Düsenkennzahl ermittelt, die je nach späterem Einsatzzweck der Düse die Form eines Volumen- oder Massedurchflusses haben und verschiedene Niveaus der Berücksichtigung der einzelnen Abhängigkeiten der Düsenkennzahl von den Zustandsparametern aufweisen kann.

Die im folgenden aufgeführten Arbeitsgleichungen für die rechnerische Ermittlung der jeweiligen Düsenkennzahlen sind Zahlenwertgleichungen und einheitenangepaßt, was ggf. zu Unterschieden in den Werten für einige Konstanten im Vergleich zu den zitierten Quellen führen kann. Die aktuell verwendeten Einheiten für die einzelnen Meßgrößen sind in Abschnitt 8.2 zusammengestellt.

3.2.1 Ermittlung der Düsenkennzahl $Q_{V,20,tr}$ (1-Punkt-Prüfung)

Die Düsenkennzahl $Q_{V,20,tr}$ berücksichtigt nur die Abhängigkeit des durch die Düse realisierten Durchflusses von der Temperatur und der Prüfluftfeuchte. Die Abhängigkeit vom Eingangsdruck wird vernachlässigt. Es gelten die folgenden Arbeitsgleichungen:

$$Q_{V,20,tr} = \frac{\rho_N}{\rho_D} \cdot \frac{1}{(1 + 0,169 \cdot x_v)} \cdot \sqrt{\frac{293,15}{T_D}} \cdot Q_N \quad (11)$$

mit

$$Q_N = \frac{V_N}{t} \cdot \frac{1}{(1 + f_N / 100)} \cdot 3600 \text{ s.} \quad (12)$$

In der Gleichung (11) für $Q_{V,20,tr}$ erfolgt die Umrechnung des thermodynamischen Zustandes vom Normalzähler auf die Düse mit Hilfe des entsprechenden Dichteverhältnisses. Der zweite Faktor dieser Gleichung berücksichtigt die bereits genannte Feuchteabhängigkeit des Düsendurchflusses gemäß [4] (es wird auf 0 % relative Feuchte umgerechnet), der dritte Faktor die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit (Bezugstemperatur 20 °C).

Die jeweilige Dichte ρ_i berechnet sich gemäß BIPM-Empfehlung für die Bestimmung der Dichte von feuchter Luft [6], wobei der Index i die unterschiedlichen Zustände am Normal (Index N) bzw. vor der Düse (Index D) bezeichnet:

$$\rho_i = \frac{p_i M_a}{Z_i R_0 T_i} \cdot \left[1 - x_v \cdot \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] = 0,348353 \cdot \frac{p_i}{Z_i T_i} \cdot (1 - 0,3780 \cdot x_v). \quad (13)$$

Der jeweilige Realgasfaktor Z_i wird bestimmt zu

$$Z_i = 1 - \frac{p_i}{(273,15 + t_i)} \cdot \left[1,62419 \cdot 10^{-4} - 2,8969 \cdot 10^{-6} \cdot t_i + 1,0880 \cdot 10^{-8} \cdot t_i^2 \right. \\ \left. + (5,757 \cdot 10^{-4} - 2,589 \cdot 10^{-6} \cdot t_i) \cdot x_v + (1,9297 \cdot 10^{-2} - 2,285 \cdot 10^{-4} \cdot t_i) \cdot x_v^2 \right] \\ + \frac{p_i^2}{(273,15 + t_i)^2} \cdot (1,73 \cdot 10^{-7} - 1,034 \cdot 10^{-4} \cdot x_v^2) \quad (14)$$

Der molare Wasserdampfanteil x_v wird in der Regel aus den Umgebungsbedingungen im Meßraum, aus dem die Prüfluft angesaugt wird, bestimmt. Dabei wird davon ausgegangen, daß keinerlei Kondensation der feuchten Luft im Meßraum oder in der Meßanordnung erfolgt und sich der molare Wasserdampfanteil damit nicht ändert. Der Wert für x_v kann entweder mit Hilfe der Taupunkttemperatur t_r oder der relativen Luftfeuchtigkeit h ermittelt werden.

Bei Verwendung der Taupunkttemperatur t_r gelten die folgenden Gleichungen (15) bis (17), wobei als zusätzlicher Meßwert der jeweilige Umgebungsluftdruck p_a benötigt wird:

$$x_v = f(p_a, t_r) \cdot \frac{p_{sv}(t_r)}{p_a} \cdot 10^{-2} \quad (15)$$

mit

$$f(p_a, t_r) = 1,00062 + 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot p_a + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot t_r^2 \quad (16)$$

$$p_{sv}(t_r) = \exp \left[1,2811805 \cdot 10^{-5} \cdot (273,15 + t_r)^2 - 1,9509874 \cdot 10^{-2} \cdot (273,15 + t_r) \right. \\ \left. + 34,04926034 - 6,3536311 \cdot 10^3 \cdot (273,15 + t_r)^{-1} \right] \quad (17)$$

Wird für die Ermittlung des molaren Wasserdampfanteils x_v die relative Luftfeuchtigkeit h verwendet, ist neben dem Umgebungsdruck p_a auch die Umgebungstemperatur t_a erforderlich und es gelten die Gleichungen (18) bis (21):

$$x_v = h \cdot x_{sv}(t_a) \cdot 10^{-2} \quad (18)$$

mit

$$x_{sv}(t_a) = f(p_a, t_a) \cdot \frac{p_{sv}(t_a)}{p_a} \cdot 10^{-2} \quad (19)$$

$$f(p_a, t_a) = 1,00062 + 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot p_a + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot t_a^2 \quad (20)$$

$$p_{sv}(t_a) = \exp \left[1,2811805 \cdot 10^{-5} \cdot (273,15 + t_a)^2 - 1,9509874 \cdot 10^{-2} \cdot (273,15 + t_a) + 34,04926034 - 6,3536311 \cdot 10^3 \cdot (273,15 + t_a)^{-1} \right] \quad (21)$$

Generell ist zur Ermittlung der entsprechenden Meßwerte für die x_v -Berechnung anzumerken, daß die Taupunkttemperatur t_r bzw. die relative Luftfeuchtigkeit h möglichst in der Nähe des Eingangs in die Meßanordnung gemessen werden sollten, und daß die verwendeten Werte für den Umgebungsdruck p_a und die Umgebungstemperatur t_a grundsätzlich unmittelbar am Feuchtemeßgerät zu messen sind.

Erfolgt die Bestimmung der Prüfluftfeuchte mit Hilfe eines in der Meßanordnung im Prüfluftstrom installierten Feuchtesensors, gelten die o. g. Gleichungen, wenn p_a und t_a durch die entsprechenden Druck- und Temperaturmeßwerte am Einbauort des Feuchtesensors ersetzt werden.

3.2.2 Ermittlung der Düsenkennzahl $Q_{V,20, tr, 1000}$ (2-Punkt-Prüfung)

Über die bei der 1-Punkt-Prüfung bereits beschriebene Ermittlung der Abhängigkeiten der Düsenkennzahl $Q_{V,20, tr}$ von Temperatur und Prüfluftfeuchte hinaus wird bei der 2-Punkt-Prüfung auch die Eingangsdruckabhängigkeit der Düsenkennzahl bestimmt. Sie wird in Form des Korrekturfaktors c_{pE} berücksichtigt. Die zugehörige Düsenkennzahl wird auf den Bezugsdruck von 1000 mbar am Düseneingang umgerechnet und mit $Q_{V,20, tr, 1000}$ bezeichnet.

$$Q_{V,20, tr, 1000} = Q_{V,20, tr} \cdot \frac{1}{1 + c_{pE} \cdot (p_D - 1000 \text{ mbar})} \quad (22)$$

In Übereinstimmung mit den in Abschnitt 3.1.4 hinsichtlich des Prüfumfanges dargelegten Anforderungen sind bei einer 2-Punkt-Prüfung zu bestimmen:

$Q_{V,20,tr,p_{max}}$ bei $p_{D,max}$ durch mindestens zwei Messungen zu Beginn und eine Wiederholungsmessung am Ende des Prüfzyklus bei Atmosphärendruckbedingungen

$Q_{V,20,tr,p_{min}}$ bei $p_{D,min}$ durch mindestens zwei Messungen bei einer Druckabsenkung vor der Düse um mindestens 50 mbar.

Aus diesen Meßwerten werden berechnet:

$$c' = \frac{Q_{V,20,tr,p_{max}} - Q_{V,20,tr,p_{min}}}{p_{D,max} - p_{D,min}} \quad (23)$$

$$Q_{V,20,tr,1000} = Q_{V,20,tr,p_{max}} - c' \cdot (p_{D,max} - 1000) \quad (24)$$

$$c_{pE} = \frac{c'}{Q_{V,20,tr,1000}} \quad (25)$$

3.2.3 Ermittlung des Massedurchflusses $Q_{m,20,tr}$ bzw. $Q_{m,20,tr,1000}$

Wird anstelle des Volumendurchflusses $Q_{V,20,tr}$ als Düsenparameter der Massedurchfluß $Q_{m,20,tr}$ bestimmt, ist anstelle der Gleichung (11) die Beziehung

$$Q_{m,20,tr,pD} = \rho_N \cdot \frac{1}{(1 - 0,210 \cdot x_v)} \cdot \sqrt{\frac{T_D}{293,15}} \cdot Q_N \quad (26)$$

zu verwenden (s. auch [4]).

Für die 2-Punkt-Prüfung ist Abschnitt 3.2.2 sinngemäß anzuwenden und es gilt:

$$Q_{m,20,tr,1000} = Q_{m,20,tr,pD} \cdot \frac{1}{1 + c_{pE} \cdot (p_D - 1000 \text{ mbar})} \cdot \frac{1000 \text{ mbar}}{p_D} \quad (27)$$

3.3 Separate Prüfung einer Einzeldüse

Hierbei wird nur die Einzeldüse separat ohne die für die spätere Anwendung vorgesehenen Meß- und Einbauvorrichtungen geprüft. Für die Prüfung der Düse ist deshalb ein spezieller Düsenträger erforderlich, der die Anströmverhältnisse sowie die Bedingungen für die Druck- und Temperaturmessungen vor der Düse so nachbildet, daß diese den Bedingungen bei der späteren Verwendung im Prüfstand weitestgehend entsprechen.

Anhand des im folgenden aufgeführten Berechnungsbeispielen wird ein kompletter Ablauf einer 2-Punkt-Prüfung für eine Düse dargestellt. Alle aufzunehmenden Meßwerte werden aufgelistet und die zugehörigen Berechnungen beschrieben.

Bild 6 zeigt schematisch den verwendeten experimentellen Aufbau.

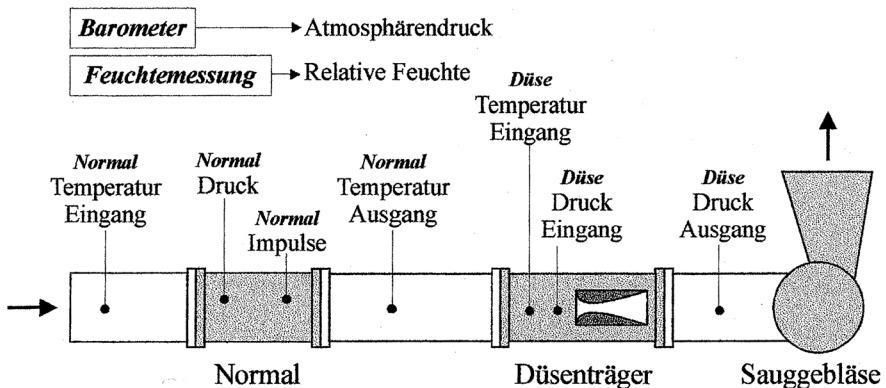


Bild 6 : Experimenteller Aufbau der für das Berechnungsbeispiel verwendeten Meßanordnung

Als konkrete Meßgeräte werden verwendet:

Prüfling:	Venturidüse Öffnungsdurchmesser ca. 23,5 mm Nenndurchfluß $Q_{\text{nenn}} = 300 \text{ m}^3/\text{h}$
Kontrollnormal:	Turbinenradgaszähler G 650 Meßabweichung bei Q_{nenn} : $f_N = + 0,10 \%$.

Nach erfolgter Temperierung und dem erforderlichen Vorlauf wird nach Erreichen konstanter Drücke und Temperaturen die Zeitmessung mit fliegendem Start und Stopp ausgelöst. Das Prüfvolumen wird so gewählt, daß eine Meßzeit t von mindestens 60 s oder 100 000 Impulse des HF-Gebers am Normalzähler erreicht werden. Im Beispiel wird durch Verwendung eines NF-Impulsgebers die Messung nach Erreichen des vorgeestellten Prüfvolumens von 10 000 dm³ gestoppt. Das Volumen am Normalzähler wird durch die ebenfalls erfaßten HF-Impulse kontrolliert, bei Abweichungen von mehr als 0,005 % wird das auf Grund der HF-Impulse berechnete Volumen zur Auswertung verwendet.

Aus der ersten Prüfung bei Atmosphärendruck ergeben sich folgende Meßwerte:

Atmosphärendruck:	$p_a = 1005,2$ mbar
Prüfraumtemperatur:	$t_a = 20,20$ °C
relative Feuchte der Prüfluft:	$h = 35$ %
Eingangsdruck am Normal:	$p_N = 1005,2$ mbar
Temperatur am Normal:	$t_N = 20,15$ °C
Eingangsdruck an der Düse:	$p_D = 1003,8$ mbar
Eingangstemperatur an der Düse:	$t_D = 20,25$ °C
Zählwerkfortschritt am Normal:	$V_N = 10\,000$ dm ³
Meßabweichung des Normals:	$f_N = +0,10$ %
Meßzeit für V_N :	$t = 120,35$ s.

Entsprechend den in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Gleichungen werden daraus folgende Zwischenwerte errechnet:

Prüfraum-Absoluttemperatur:	$T_a = 293,35$ K
Absoluttemperatur am Normal:	$T_N = 293,30$ K
Absoluttemperatur an der Düse:	$T_D = 293,40$ K
Sättigungsdampfdruck:	$p_{sv} = 23,68$ mbar
Korrekturfaktor:	$f(t_a, p_a) = 1,00400$
molarer Wasserdampfanteil:	$x_v = 0,008277$
Realgasfaktor am Normal:	$Z_N = 0,99961$
Realgasfaktor an der Düse:	$Z_D = 0,99961$
Prüfluftdichte am Normal:	$\rho_N = 1,19059$ kg/m ³
Prüfluftdichte an der Düse:	$\rho_D = 1,18853$ kg/m ³ .

Damit wird für die erste Messung die auf trockene Luft bezogene Düsenkennzahl gemäß Gleichung (11) berechnet zu

$$Q_{V,20,tr} = 298,80 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Die Meß- und Berechnungsergebnisse aller erforderlichen Prüfungen des Beispiels (insgesamt fünf Einzelmessungen für eine 2-Punkt-Prüfung) sind in den nachstehenden Tabellen 3 und 4 zusammengestellt.

Tabelle 3: Meßergebnisse des Beispiels für eine separat geprüfte Düse

Q_{nenn}	f_N	p_N	t_N	p_D	t_D	V_N	h	t	$Q_{V,20,tr}$
m ³ /h	%	mbar	°C	mbar	°C	m ³ /h	%	s	m ³ /h
Prüfung bei Atmosphärendruckbedingungen									
300,0	0,10	1005,2	20,15	1003,8	20,25	10 000	35	120,35	298,80
300,0	0,10	1005,2	20,20	1003,8	20,25	10 000	35	120,34	298,78
Geänderter Düsenvordruck für 2-Punkt-Prüfung (durch Drosselung zwischen Normal und Düse)									
300,0	0,10	1005,2	20,30	950,1	20,30	10 000	35	120,40	298,57
300,0	0,10	1005,2	20,35	950,1	20,30	10 000	35	120,41	298,50
Wiederholungsprüfung bei Atmosphärendruckbedingungen									
300,0	0,10	1005,2	20,30	1003,8	20,25	10 000	35	120,30	298,77

Aus den Einzelergebnissen der drei Messungen bei atmosphärischem Druck und den zwei Messungen bei geänderter Vordruck werden jeweils Mittelwerte gebildet. Damit ergeben sich die nach den Gleichungen (22) bis (25) errechneten Prüfscheinangaben für $Q_{V,20,tr,1000}$ und c_{pE} , wie in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Ermittlung der Düsenkennzahl $Q_{V,20, tr, 1000}$ und des Korrekturfaktors c_{pE}

$p_{D, max}$	$Q_{V, 20, tr, max}$	$p_{D, min}$	$Q_{V, 20, tr, min}$	$Q_{V, 20, tr, 1000}$	c_{pE}
mbar	m ³ /h	mbar	m ³ /h	m ³ /h	–
1003,8	298,78	950,1	298,53	298,76	$1,6 \cdot 10^{-5}$

3.4 Prüfung von Düsen im Einbauzustand

Hierbei wird für die Prüfung der gesamte Düsenprüfstand an das Normal angeschlossen. Die Prüfung der Düsen erfolgt im Einbauzustand, d. h. exakt in der Meßkonfiguration, in der sie auch bei der späteren Anwendung eingesetzt werden.

Die Düsenprüfung erfolgt im Prinzip wie in Abschnitt 3.3 beschrieben. Anstelle des in Bild 6 dargestellten Düsenträgers wird der Prüfstand installiert. Für die Erfassung der Temperatur- und Druckmeßwerte vor der Düse werden anstelle der externen Geräte die im Prüfstand vorhandenen Meßaufnehmer verwendet.

Zusätzlich können in Prüfständen, die mit parallelgeschalteten Düsen arbeiten, nach Abschluß der Düseneinzelprüfungen ggf. auch Kombinationen dieser Düsen überprüft werden, um eine gegenseitige Beeinflussung zu erkennen. Dazu sind die Düsen einzeln und parallel unter Wiederholbedingungen zu betreiben und die jeweiligen Durchflüsse zu ermitteln. Eine gegenseitige Beeinflussung der Düsen bei ihrem Parallelbetrieb liegt nicht vor oder kann vernachlässigt werden, wenn die jeweilige Differenz zwischen der Summe der so ermittelten Einzeldurchflüsse von dem ermittelten Gesamtdurchfluß der jeweils zusammengeschalteten Düsen die Hälfte der Prüfstandsmeßunsicherheit nicht überschreitet.

Anhand des folgenden Beispiels wird der Ablauf der Prüfung von Düsen im Einbauzustand beschrieben:

Prüflinge: Prüfstand mit einem Satz von drei Düsen für die Prüfung von Haushaltsbalgengaszählern der Größe G 4

Kontrollnormal: Trommelgaszähler NB 2 und NB 15

Nach erfolgter Temperierung und dem erforderlichen Vorlauf wird nach Erreichen konstanter Drücke und Temperaturen die Zeitmessung mit fliegendem Start und Stopp

ausgelöst. Das Prüfvolumen wird so gewählt, daß mindestens zwei volle Umdrehungen der Meßtrommel des Normalzählers bzw. eine Meßzeit von 60 s erreicht werden. Im Beispiel wird durch Verwendung eines Reedkontaktes die Messung nach Erreichen des voreingestellten Prüfvolumens beendet.

Aus der exemplarisch herausgegriffenen ersten Prüfung bei Atmosphärendruck der Düse 3 mit dem Trommelgaszähler NB 15 ergeben sich folgende Meßwerte:

Atmosphärendruck:	$p_a = 991,2 \text{ mbar}$
Prüfraumtemperatur:	$t_a = 23,30 \text{ °C}$
relative Feuchte der Prüfluft:	$h = 25 \%$
Eingangsdruck am Normal:	$p_N = 991,2 \text{ mbar}$
Temperatur am Normal:	$t_N = 23,15 \text{ °C}$
Eingangsdruck an der Düse:	$p_D = 989,8 \text{ mbar}$
Eingangstemperatur an der Düse:	$t_D = 23,45 \text{ °C}$
Zählwerkfortschritt am Normal:	$V_N = 200 \text{ dm}^3$
Meßabweichung des Normals:	$f_N = + 0,10 \%$
Meßzeit für V_N :	$t = 120,08 \text{ s}$

Entsprechend den in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Gleichungen werden daraus folgende Zwischenwerte errechnet:

Prüfraum-Absoluttemperatur:	$T_a = 296,45 \text{ K}$
Absoluttemperatur am Normal:	$T_N = 296,30 \text{ K}$
Absoluttemperatur an der Düse:	$T_D = 296,60 \text{ K}$
Sättigungsdampfdruck:	$p_{sv} = 28,62 \text{ mbar}$
Korrekturfaktor:	$f(t_a, p_a) = 1,004 \text{ 04}$
molarer Wasserdampfanteil:	$x_v = 0,007 \text{ 246}$
Realgasfaktor am Normal:	$Z_N = 0,999 \text{ 65}$
Realgasfaktor an der Düse:	$Z_D = 0,999 \text{ 65}$
Prüfluftdichte am Normal:	$\rho_N = 1,162 \text{ 54 kg/m}^3$
Prüfluftdichte an der Düse:	$\rho_D = 1,159 \text{ 72 kg/m}^3$

Damit wird die auf trockene Luft bezogene Düsenkennzahl für Düse 3 nach Gleichung (11) berechnet zu

$$Q_{v,20, \text{tr}} = 5,9623 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Die Meß- und Berechnungsergebnisse aller erforderlichen Prüfungen des Beispiels sind in den nachstehenden Tabellen 5 und 6 zusammengestellt. Die Berechnung der Meßunsicherheit für die beschriebene Düsenkennzahlbestimmung wird in Anhang B beschrieben.

Tabelle 5: Meßergebnisse des Beispiels für die Prüfung eines im Prüfstand eingebauten Düsensatzes

Nr.	Q_{nenn}	f_N	p_N	t_N	p_D	t_D	V_N	h	t	$Q_{V, 20, tr}$
	m ³ /h	%	mbar	°C	mbar	°C	m ³ /h	%	s	m ³ /h
Prüfung bei Atmosphärendruckbedingungen mit Normaltrommelgaszähler NB 2										
1	0,04	0,10	991,3	23,30	991,2	23,30	10	24	968,72	0,036 88
1	0,04	0,10	991,3	23,30	991,2	23,30	10	24	968,64	0,036 88
2	1,2	- 0,18	991,3	23,35	991,0	23,25	30	24	89,27	1,2039
2	1,2	- 0,18	991,3	23,40	991,0	23,25	30	24	89,25	1,2039
geänderter Düsenvordruck für 2-Punkt-Prüfung (durch Drosselung zwischen Normal und Prüfstand)										
1	0,04	0,10	930,3	23,45	930,2	23,20	10	24	972,65	0,036 70
1	0,04	0,10	930,3	23,45	930,2	23,20	10	24	972,82	0,036 70
2	1,2	- 0,18	930,3	23,50	930,0	23,25	30	24	89,39	1,2017
2	1,2	- 0,18	930,3	23,50	930,0	23,25	30	24	89,38	1,2018
Wiederholungsprüfung bei Atmosphärendruckbedingungen mit Normaltrommelgaszähler NB 2										
1	0,04	0,10	991,3	23,45	991,2	23,40	10	24	968,10	0,036 89
2	1,2	- 0,18	991,3	23,50	991,0	23,20	30	24	89,26	1,2033

Fortsetzung Tabelle 5

Nr.	Q_{nenn}	f_N	p_N	t_N	p_D	t_D	V_N	h	t	$Q_{V, 20, \text{tr}}$
	m ³ /h	%	mbar	°C	mbar	°C	m ³ /h	%	s	m ³ /h
Prüfung bei Atmosphärendruckbedingungen mit Normaltrommelgaszähler NB 15										
2	1,2	0,06	991,2	23,10	991,1	23,30	100	25	297,27	1,2030
2	1,2	0,06	991,2	23,10	991,1	23,30	100	25	297,31	1,2028
3	6,0	0,10	991,2	23,15	989,8	23,45	200	25	120,08	5,9623
3	6,0	0,10	991,2	23,20	989,8	23,45	200	25	120,05	5,9627
geänderter Düsenvordruck für 2-Punkt-Prüfung (durch Drosselung zwischen Normal und Prüfstand)										
2	1,2	0,06	935,3	23,25	935,2	23,25	100	25	297,58	1,2010
2	1,2	0,06	935,3	23,25	935,2	23,20	100	25	297,54	1,2011
3	6,0	0,10	936,5	23,30	936,1	23,40	200	25	120,32	5,9410
3	6,0	0,10	936,5	23,35	936,1	23,45	200	25	120,31	5,9410
Wiederholungsprüfung bei Atmosphärendruckbedingungen mit Normaltrommelgaszähler NB 15										
2	1,2	0,06	991,2	23,30	991,1	23,30	100	25	297,09	1,2029
3	6,0	0,10	991,2	23,30	989,8	23,45	200	25	120,02	5,9622

Mit den jeweiligen Mittelwerten von $Q_{V, 20, \text{tr}}$ errechnen sich die nach den Gleichungen (22) bis (25) ermittelten Prüfscheinangaben für $Q_{V, 20, \text{tr}, 1000}$ und c_{pE} , wie in Tabelle 6 angegeben.

Tabelle 6: Ermittlung der Düsenkennzahl $Q_{V,20, tr, 1000}$ und des Korrekturfaktors c_{pE}

Nr.	$p_{D, max}$	$Q_{V, 20, tr, max}$	$p_{D, min}$	$Q_{V, 20, tr, min}$	$Q_{V, 20, tr, 1000}$	c_{pE}
–	mbar	m ³ /h	mbar	m ³ /h	m ³ /h	–
1 (NB 2)	991,2	0,036 88	930,2	0,036 70	0,036 91	$8,0 \cdot 10^{-5}$
2 (NB 2)	991,0	1,2037	930,0	1,2017	1,2039	$2,7 \cdot 10^{-5}$
2 (NB 15)	991,1	1,2029	935,2	1,2010	1,2032	$2,8 \cdot 10^{-5}$
3 (NB 15)	989,8	5,9624	936,1	5,9410	5,9663	$6,7 \cdot 10^{-5}$

Für Düse 2, die mit zwei Normalen kalibriert wurde, werden als mittlere Düsenkennzahl $Q_{V,20, tr, 1000} = 1,2036 \text{ m}^3/\text{h}$ und als mittlerer Korrekturfaktor $c_{pE} = 2,7 \cdot 10^{-5}$ ermittelt.

3.5 Kennzeichnung der Düsen

Düsen, die als Normale eingesetzt werden, müssen gültig geprüft sein. Die dabei festgestellten individuellen Düsenparameter werden im Prüfschein (s. 3.6) dokumentiert und sind für den Betrieb der Düse verbindlich. Prüfschein und Düse müssen daher durch eine eindeutige Kennzeichnung zuordenbar und ohne technische Hilfsmittel für den Anwender lesbar sein.

Die äußeren Körpergeometrien sind meist von zylindrischer Form, die auf ihren Umfangs- oder Stirnflächen Platz für kennzeichnenden Text bieten. Für eine dauerhafte Beschriftung stehen mechanische und elektrische Verfahren zur Verfügung.

Bei den mechanischen Verfahren (Kerbschlag, Gravur o. ä.) ist insbesondere auf unzulässige Verformung durch Schlag- oder Spannkkräfte zu achten. Herstellerseitig wird eine Kerbschlagkennzeichnung meist vor dem Fertigungsprozeß der Düse durchgeführt.

Die Elektrophoresegravur (Lichtbogen) verursacht keine mechanische Belastung, setzt aber beim Schreiben geringfügige Metallspritzer frei, so daß die Düsenbohrung durch geeignete Abdeckung geschützt werden muß.

Jede Düse sollte mindestens folgende Angaben zu ihrer individuellen Kennzeichnung besitzen:

- Herstellerkennung
- Herstellungsjahr
- Fabrikationsnummer
- ggf. Angaben, aus denen die Größe zu ersehen ist (Durchmesser oder Nenndurchfluß)
- ggf. Angaben zur Form.

In jedem Fall ist die Durchströmungsrichtung der Düse eindeutig zu kennzeichnen. Dies kann durch Anbringung eines Pfeiles auf dem Düsenkörper erfolgen. Empfohlen wird die Sicherstellung des richtigen Einbaus bereits durch eine entsprechende konstruktive Gestaltung der Düsen, die einen Einbau entgegen der Strömungsrichtung von vornherein nicht zuläßt.

3.6 Prüfschein und Gültigkeitsdauer der Prüfung

Über die Ergebnisse der erfolgten Prüfung ist ein Prüfschein zu erstellen. Darin müssen folgende Angaben enthalten sein:

- prüfende Stelle
- Art und Klasse der zur Prüfung verwendeten Volumennormale
- Antragsteller
- Art der Düse/des Düsenatzes
- Herstellungsjahr
- Fabrikationsnummer
- Verwendungszweck
- festgelegte Werte für $Q_{V, 20, tr}$ bzw. $Q_{V, 20, tr, 1000}$ und c_{pE}
- erzielte Meßunsicherheit bei der Prüfung und ggf. für die Anwendung
- Gültigkeitsdauer bzw. Zeitintervall bis zur Wiederholung der Prüfung
- ggf. Berechnungsgleichung(en) für den Durchfluß, der bei der Anwendung der Düse am Einbauort des Prüflings erzeugt wird.

Die Gültigkeitsdauer der Prüfung für kritisch betriebene Düsen beträgt nach der Eichanweisung – Allgemeine Vorschriften – zehn Jahre. Dies gilt bisher aber nur für Venturidüsen nach ISO 9300 mit einem Nenndurchfluß von mehr als 35 m³/h. Für

Düsen mit einem Nenndurchfluß zwischen 2 m³/h und 35 m³/h wird nunmehr ebenfalls eine Gültigkeitsdauer von zehn Jahren, für kleinere Düsen oder Düsen anderer Bauform eine Gültigkeitsdauer von fünf Jahren für angemessen gehalten.

In begründeten Fällen, z. B. neuer Hersteller, anderes Düsenmaterial, geänderte Düsenform, können auch kürzere Nachprüffristen festgelegt werden.

4 Anforderungen an Düsenprüfstände

Die Prüfstände müssen so aufgebaut und ausgeführt sein, daß die Sicherheit des Betriebes und die Meßsicherheit innerhalb der vorgeschriebenen Fehlergrenzen jederzeit gewährleistet ist. Für jeden Prüfstand ist ein Prüfstandshandbuch anzulegen. In dieses Handbuch sind die jeweils im Einsatz befindlichen Düsen mit Kennung, Einbauort und den meßtechnisch relevanten Düsenparametern (s. Beispiel in Tabelle 7) sowie sämtliche Hardware- und Softwareänderungen (s. Beispiel in Tabelle 8) einzutragen und vom leitenden Prüfstellenpersonal abzuzeichnen.

4.1 Hardware

Über den Aufbau jedes Prüfstandes muß neben dem Prüfstandshandbuch eine Dokumentation vorliegen, aus der u. a. alle eingesetzten Hilfsmeßgeräte und deren Anschluß- bzw. Einbaustellen zu erkennen sind.

Eine Überprüfung der Dichtheit sowie der Einhaltung des überkritischen Druckverhältnisses muß ohne besonderen Aufwand möglich sein. Insbesondere ist auf die Verhinderung von eventuellen Bypass-Bildungen durch die Einbauweise der Düsen und daraus resultierende Leckverluste zu achten. Die Düsen sind hinsichtlich ihrer Durchflüsse so auszulegen, daß die in den gültigen Prüfregeln [2] vorgeschriebenen Prüfbelastungen in den jeweils festgelegten Grenzen eingehalten werden können. Dies kann durch Einzeldüsen oder Düsenkombinationen realisiert werden.

Machen es Einsatzzweck und/oder konstruktive Gestaltung des Prüfstandes erforderlich, können Düsen innerhalb der festgelegten Gültigkeitsdauer der Betriebsgenehmigung bzw. meßtechnischen Prüfung regulär ausgetauscht werden. Ein solcher Düsen austausch ist bei der Erteilung der Betriebsgenehmigung gesondert zu behandeln. Entsprechende Auflagen hinsichtlich der Kennzeichnung der im Einsatz befindlichen Düsen und der Sicherung der korrekten Übernahme der Düsenparameter in die

Prüfstandssoftware sind festzulegen. Jeder Düsentausch ist im Prüfstandshandbuch zu dokumentieren.

Tabelle 7: Beispiel: Handbuch-Eintragen für die im Einsatz befindlichen Düsen

Handbuch: Düsen						
Düsenkennung	Meßstrecke/ Einbauort	gültig geprüft bis	Satz Nr.	Datum	Änderung	verant- wortlich
FA 0,275/3/96	Strang 1	30.6.01	1	2.1.97	Erstinbetrieb- nahme	Muster- mann
FA 1,51/3/96	Strang 2	30.6.01	1	2.1.97	Erstinbetrieb- nahme	Muster- mann
FA 0,334/5/96	Strang 1	15.9.01	2	31.3.97	Düsen- wechsel	Muster- frau

4.2 Software

Die Prüfstands-Software stellt das immaterielle (gegenstandslose) Programm zur Anlagensteuerung dar. In Verbindung mit der Hardware ist sie ein wesentlicher Teil der Gesamtanlage „Prüfstand“. Das Programm hat die Aufgabe, den Anlagenprozeß gemäß den Vorgaben zu organisieren, die Daten zu verwalten, neue Meßwerte zu bilden und die Kommunikation mit dem Nutzer zu führen.

An die Richtigkeit der erzielten Ergebnisse werden hohe Anforderungen gestellt. Entsprechend ist der Bedarf an Kontroll-, Prüf- und Sicherheitseinrichtungen für den Anwender, der den Prüfprozeß auf Richtigkeit der Ergebnisse durch Plausibilitätsvergleich überwacht.

Die im Prüfstand verwendete Software muß eine Versionsbezeichnung mit Erstellungsdatum tragen und diese zumindest beim Starten des Programms auf dem Bildschirm anzeigen. Die Software soll weitgehende Sicherheit gegen Bedienungsfehler und nicht genehmigte Programmänderungen bieten (s. u.). Eine menuegesteuerte Bedienung ohne komplizierte Gebrauchsanweisung ist anzustreben.

Die Reihenfolge der Dateneingabe von außen soll dem tatsächlichen Prüfablauf entsprechen. Die Art und Anzahl der aufgenommenen Meßwerte hat den Forderungen der eichrechtlichen Vorschriften (Technische Richtlinien, Prüfregeln) zu genügen.

Es muß die Möglichkeit bestehen, fehlerhaft eingegebene Werte vor der Auswertung zu korrigieren sowie einen Prüfgang zu unterbrechen und auf einfache Weise neu zu beginnen. Nach der Auswertung darf eine Änderung von Meßergebnissen nicht möglich sein. Eine direkte Vergleichbarkeit der berechneten Meßabweichungen mit den geltenden Fehlergrenzen muß gegeben sein. Die einschlägigen eichrechtlichen Vorschriften für amtliche Prüfungen sind einzuhalten (z. B. ist die einseitige Ausnutzung von Fehlergrenzen unzulässig).

Die Berechnung der Meßabweichung der Prüflinge muß nach den in dieser Prüfregel (Abschnitt 7.1) angegebenen Gleichungen erfolgen. Der Eichbehörde ist diese Berechnung mit allen Korrekturfaktoren sowie auf Verlangen das entsprechende Programmlisting oder ein Flußplan der Berechnungen vorzulegen.

Zur Überwachung durch die Eichbehörde muß ein Ausdrucken aller Meßwerte möglich sein, die zur Berechnung der Meßabweichung verwendet werden. Diese Möglichkeit sollte zweckmäßigerweise auch für den Anwender bestehen. Im übrigen ist eine Speicherung sämtlicher Prüflingsdaten und Meßergebnisse in einer Datenbank empfehlenswert, z. B. zum Zwecke der Nachberechnung oder späterer statistischer Auswertung.

Aus dem Protokoll für amtliche Prüfungen müssen mindestens folgende Angaben für den Prüfling (eventuell auch in kodierter Form) hervorgehen:

- Fabriknummer
- Baujahr
- Fabrikat, Typ
- Belastung (Sollwert)
- Justierung
- Ergebnis der Zählwerkskontrolle
- Größe
- Zulassungsnummer
- Datum
- Meßabweichung, zugeordnet zur Belastung
- Impulswertigkeit
- Prüfungsart.

Darüber hinaus sind Name des Prüfers und Prüfstandsnummer zu dokumentieren.

4.2.1 Zugangsberechtigungen

Je nach Zugangsberechtigung des bedienenden Personals werden verschiedene Zugangsbereiche unterschieden. So muß der Zugang für das berechtigte Personal zur

Bedienung des Programms, zur Änderung von prüfungsrelevanten Daten sowie von Daten, die eichamtlicher Aufsicht unterliegen, durch Einführung entsprechender Paßwortebenen geschützt sein. Im einzelnen gelten folgende Regelungen:

Bedienbereich

Hier wird der Zugang so geregelt, daß das berechnigte Bedienpersonal die Anlage betreiben kann.

Alle Meßdaten und Parameter, die zur sachgerechten Führung der Anlage notwendig sind, müssen während des Betriebes frei darstellbar sein und dem Bediener zu Kontrollzwecken zur Verfügung stehen (Lesefunktion). Eine Änderung der Daten darf nicht durchführbar sein.

Setzbereich

Hier erfolgt das Einstellen (Setzen) von Parametern, die auf den Ablauf und Umfang der Prüfung Einfluß nehmen, aber keine eichrechtlich relevanten Parameter verändern.

Daten im Setzbereich sind z. B. die Bezugswerte zum Ablauf und Umfang der Prüfung, die manuelle Verschiebung der errechneten Justierung und die Grenzwerteinstellung zur Beurteilung des Zählers (Qualitätsbetrachtung).

Parametrierbereich

In diesem Bereich erfolgt der Zugriff auf alle Parameter, die eine direkte Auswirkung auf die gesuchte Meßgröße haben oder eichamtlicher Aufsicht unterliegen. Hier sind z. B. Änderungen der Kalibrierdaten (Meßaufnehmer, Düsen) möglich.

Der Zugang zum Setz- und Parametrierbereich muß geeignet, z. B. über ein Paßwort geschützt werden. Dies gilt auch für ausgelagerte Dateien.

4.2.2 Anzeigepflicht bei Softwareänderungen

Modifizierte Anlagensoftware ist durch eine Revision der Versionsbezeichnung in jedem Fall kenntlich zu machen. Wurden in der neuen Software die Grundlagen zur Fehlerberechnung oder auch Teilbereiche daraus modifiziert, so besteht gegenüber den Eichbehörden Anzeigepflicht. Die Zustimmung der jeweils zuständigen Eichbehörde ist vor der Inbetriebnahme der neuen Software einzuholen.

Nicht anzeigepflichtig sind Softwareänderungen, die lediglich Visualisierungs- oder Kommunikationsvorgänge, Datenstrukturen oder Wechsel der Betriebssysteme betreffen.

4.2.3 Kennzeichnung

Eindeutig identifiziert wird die Prüfstandssoftware durch ihren Namen, die Versionsnummer und das Betriebssystem, unter dem sie läuft. Der Verwaltungsaufbau der Programm- und Versionsbezeichnung (Fortschreibung der Versionsnummer) obliegt dem Hersteller, der auch die zugehörige Programmdokumentation zur Verfügung stellt.

Durch eine geeignete Verwaltung im Prüfprogramm (z. B. Prüfstandshandbuch – Beispiel s. Tabelle 8) muß sichergestellt sein, daß die jeweils für den Betrieb der Anlage eingesetzte Software dem Benutzer in ihrem vollständigen Revisionsstand angezeigt werden kann. Dieser Zugang muß für jeden zugelassenen Benutzer möglich sein.

Bei einem Anlagenprogramm, das aus mehr als einer Datei besteht oder in Verbindung mit Netzrechner läuft, muß ersichtlich sein, welche ausgelagerten Dateien oder Programme noch zugehörig sind.

Tabelle 8: Beispiel: Softwareverzeichnis zum Prüfprogramm

Handbuch: Prüfstands-Software						
Ifd. Nr.	Programm-Name	Version	System	Rev. Datum	Änderung	verantwortlich
1	prfstand.exe	V1.9	DOS	2.1.97	Erstinbetriebnahme, Steuerprogramm PC	Muster-mann
2	ini.dat	–	DOS	2.1.97	Erstinbetriebnahme, Voreinstellungsdaten PC	Muster-mann
3	sps_p1	V3.4	B&R SPS	2.1.97	Erstinbetriebnahme, Steuerprogramm SPS	Muster-mann
4	prfstand.exe	V2.0	DOS	1.6.97	Drucküberwachung erweitert, Protokoll und Datenspeicherung modifiziert	Muster-mann

4.2.4 Datensicherung

Entsprechend der Aufbewahrungsfrist für Prüfprotokolle müssen die zur Berechnung der Meßabweichung verwendeten Daten dauerhaft aufbewahrt (gespeichert) werden. Form und Umfang der zu speichernden Daten richtet sich nach der Verwaltungsstruktur (Möglichkeiten) des Programms.

Wird der zur Berechnung der Korrektur der Zähleranzeige notwendige Datensatz permanent (dauerhaft) auf einem elektronischen Datenträger gespeichert, so genügt der Ausdruck eines verkürzten Prüfprotokolls (Sammelprotokoll).

Als individuelle Kontrollmöglichkeit der Berechnung der Meßabweichung muß dem Anwender auf Abruf der komplette Datensatz, wie er zur Berechnung der Meßabweichung verwendet wurde, zum Plausibilitätsvergleich verfügbar sein. Damit soll die vom Rechner durchgeführte Berechnung handschriftlich nachvollzogen werden können.

Werden die zur Berechnung der Korrektur der Zähleranzeige verwendeten relevanten Daten nur temporär (flüchtig) im Rechner gehalten, ist ein kompletter Ausdruck mit allen zur handschriftlichen Berechnung erforderlichen Daten im Prüfprotokoll notwendig (s. o.).

5 Konstruktive Gestaltung von Prüfständen

Das Kernstück eines Prüfstandes mit kritischen Düsen sind die Düsenmeßstrecken oder Düsenstränge. Sie setzen sich zusammen aus dem Einlauf vor der Düse mit den Referenzmeßstellen für Druck und Temperatur des Prüfgases, der eigentlichen kritisch betriebenen Düse, dem Auslauf hinter der Düse sowie ein oder zwei Absperrorganen. Soweit erforderlich, sind zum Schutz der Düsen und Sensoren gegen Beschädigung oder Veränderung Filter vorzusehen. Außerdem sollte auf ausreichende Dämpfung der Pulsationen von Prüflingen geachtet werden.

5.1 Auslegung der Düsen

Mit der im folgenden durchgeführten Beispielrechnung soll die Auslegung der geometrischen Abmessungen einer Venturidüse mit toroidalem Hals gezeigt werden. Dazu

müssen alle in Bild 7 eingetragenen Maße festgelegt werden. Ein Ablaufdiagramm zur Auslegung der kritischen Düsen ist in Anhang C dargestellt.

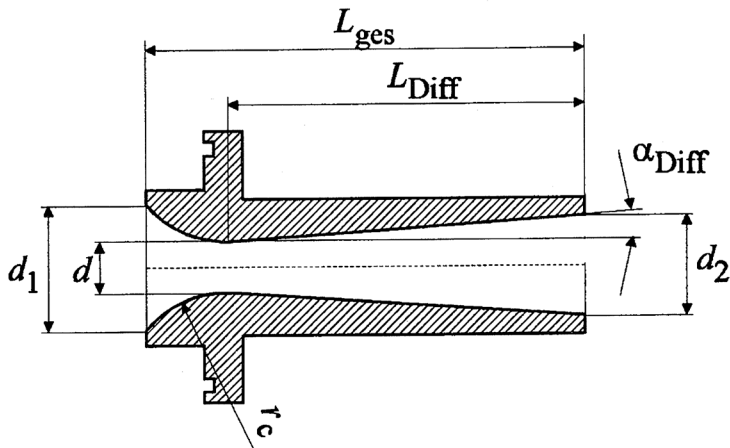


Bild 7: Beispiel für eine Venturidüse mit toroidalem Hals mit allen für die Beschreibung der Düseninnenkontur notwendigen Maßen

Damit der Durchfluß der Düse bei ihrer späteren Verwendung möglichst exakt dem gewünschten Nenndurchfluß Q_{nenn} entspricht, müssen zunächst die Umgebungsbedingungen bei ihrer Verwendung bekannt sein bzw. definiert werden.

Für das beschriebene Beispiel soll die Düse mit Luft bei einem Nenndurchfluß Q_{nenn} von $65 \text{ m}^3/\text{h}$, einer typischen Düseneingangstemperatur t_D von $20 \text{ }^\circ\text{C}$, einem Eingangsdruck p_D von 1000 mbar und einer relativen Luftfeuchtigkeit h von 50% betrieben werden. Bei der Festlegung des zu veranschlagenden Eingangsdruckes p_D ist es wichtig, auch den zu erwartenden Barometerdruck p_a sowie den Druckverlust durch Rohrleitung und Prüfling zu berücksichtigen. Die Werte für den Isentropenexponenten κ , die dynamische Viskosität η und die spezifische Gaskonstante R von Luft lassen sich aus Tabellenwerken ermitteln.

In der nachfolgenden Tabelle 9 sind diese Ausgangsdaten sowie die berechneten Werte für die kritische Strömungsfunktion c_* und die Dichte ρ_D zusammengefaßt.

Tabelle 9: Ausgangsdaten für die Beispielrechnung zur Auslegung einer kritischen Düse

Nenndurchfluß	Q_{nenn}	65	m ³ /h
Eingangsdruck vor der Düse	p_D	1000	mbar
Eingangstemperatur vor der Düse	t_D	20,00	°C
relative Luftfeuchtigkeit	h	50	%
Isentropenexponent	κ	1,400 78	–
dynamische Viskosität	η	$1,784\ 36 \cdot 10^{-5}$	kg/(m · s)
spezifische Gaskonstante	R	287,065	J/(kg · K)
kritische Strömungsfunktion	c_*	0,684 863	–
Dichte des Mediums vor der Düse	ρ_D	1,182 28	kg/m ³

Für die Berechnung des Düsendurchmessers d wird zunächst Gleichung (4) verwendet, wobei die Querschnittsfläche

$$A_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (28)$$

nach dem Durchmesser d aufgelöst wird:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{nenn}}}{\pi \cdot c \cdot c_* \cdot 3600 \text{ s} \cdot \sqrt{R \cdot (t_D + 273,15 \text{ K})}}} \cdot 10^3 \quad (29)$$

Die kritische Strömungsfunktion c_* wird mit Hilfe von Gleichung (3) berechnet. Die Berechnung des Düsenbeiwertes c erfolgt mit Gleichung (10). Für eine Düse mit toroidalem Hals sind die Kennzahlen a , b und n aus Tabelle 1 zu entnehmen. Die in Gleichung (10) enthaltene Reynoldszahl Re_d im Düsenhals kann mit Gleichung (30) ermittelt werden.

$$Re_d = \frac{4 \cdot Q_{\text{nenn}} \cdot \rho_D}{d \cdot 10^{-3} \cdot 3600 \text{ s} \cdot \pi \cdot \eta} \quad (30)$$

Die Berechnung des Düsendurchmessers d im Düsenhals ist analytisch nicht geschlossen möglich, da hierzu der Düsenbeiwert c nach Gleichung (10) erforderlich ist, der ebenfalls über die Reynoldszahl Re_d vom Düsendurchmesser d abhängt. Um den Düsendurchmesser d dennoch zu berechnen, muß hier ein iteratives Näherungsverfahren zum Einsatz kommen. Damit die Anzahl der Iterationsschritte möglichst gering gehalten wird, muß dem Iterationsverfahren ein Schätzwert d^* des Düsendurchmessers d im Düsenhals vorgegeben werden. Erfahrungsgemäß stimmt ein z. B. nach (31) ermittelter Schätzwert d^* meist schon sehr gut mit dem endgültigen Düsendurchmesser d überein.

$$d^* = 1,4 \cdot Q_{\text{nenn}}^{0,49} \quad (31)$$

Die Iteration kann normalerweise abgebrochen werden, wenn als Abbruchkriterium die relative Änderung von zwei aufeinanderfolgend berechneten Düsendurchmesserwerten $< 1 \cdot 10^{-5}$ ist. Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse der ersten Iterationsschritte für die gewählte Beispielrechnung, die unter Verwendung der Gleichungen (30), (10) und (29) erhalten wurden, wobei zur Veranschaulichung so viele Nachkommastellen gezeigt werden, um tatsächliche Änderungen innerhalb der Iterationsschritte zeigen zu können.

Tabelle 10: Ergebnisse für die Durchmesserberechnung zur Auslegung einer kritischen Düse

Schätzwert des Düsendurchmessers	d^*	10,825 689 8	mm
Düsendurchmesser im Düsenhals:			
1. Iterationsschritt	d	10,814 279 34	mm
2. Iterationsschritt	d	10,814 267 63	mm
3. Iterationsschritt	d	10,814 267 61	mm

Basierend auf dem nach Abschluß der Iteration ermittelten Düsendurchmesser lassen sich nun auch die übrigen Düsenmaße berechnen.

Für den Einlaufdurchmesser d_1 der Düse wird hier das 2,5fache des Düsendurchmessers d gewählt (vgl. Bild 7).

$$d_1 = 2,5 \cdot d \quad (32)$$

Der Einlaufradius r_c wiederum ergibt sich nach Gleichung (33) aus dem doppelten Düsendurchmesser d im Düsenhals der Düse.

$$r_c = 2 \cdot d \quad (33)$$

Die Länge L_{Diff} des Auslaufdiffusors ist für eine optimale Druckrückgewinnung auf die siebenfache Länge des Düsendurchmessers d im Düsenhals festgelegt (34).

$$L_{\text{Diff}} = 7 \cdot d \quad (34)$$

Der Ausgangsdurchmesser d_2 der Düse kann mit Gleichung (35) aus der Diffusorlänge L_{Diff} , dem Düsendurchmesser d im Düsenhals und dem Diffusorwinkel $\alpha_{\text{Diff}} = 4^\circ$ (vgl. Bild 7), angegeben in Grad, berechnet werden.

$$d_2 = 2 \cdot L_{\text{Diff}} \cdot \tan\left(\frac{\alpha_{\text{Diff}}}{180^\circ} \cdot \pi\right) + d \quad (35)$$

Gleichung (36) zur Berechnung der Düsengesamtlänge L_{Ges} erhält man aus den geometrischen Beziehungen der einzelnen Parameter zueinander.

$$L_{\text{Ges}} = \sqrt{r_c^2 - \left(r_c - \frac{d_1 - d}{2}\right)^2} + r_c \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{\text{Diff}}}{180^\circ} \cdot \pi\right) + L_{\text{Diff}} \quad (36)$$

Diese sind zum besseren Verständnis in Bild 8 gesondert dargestellt.

Tabelle 11: Endgültige Düsenparameter

Nenndurchfluß	Q_{nenn}	65	m ³ /h
Düsendurchmesser im Düsenhals	d	10,814	mm
Einlaufdurchmesser	d_1	27,036	mm
Einlaufradius	r_c	21,629	mm
Diffusorwinkel	α_{Diff}	4	°
Diffusorlänge	L_{Diff}	75,700	mm
Ausgangsdurchmesser	d_2	21,401	mm
Düsengesamtlänge	L_{Ges}	94,092	mm

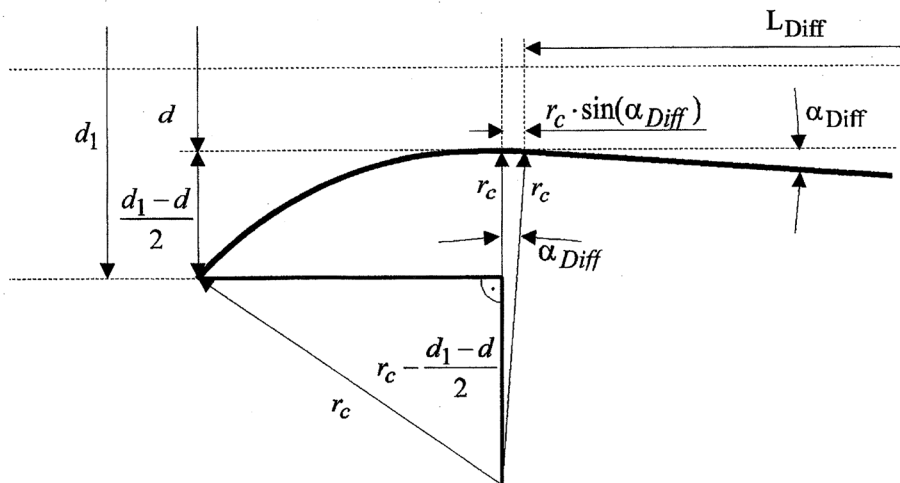


Bild 8: Detaildarstellung der Düseninnenkontur im Düsenhals

Alle Maße und Angaben, die zur Auslegung der Beispieldüse mit einem Nenndurchfluß $Q_{\text{nein}} = 65 \text{ m}^3/\text{h}$ benötigt werden, sind noch einmal in Tabelle 11 zusammengefaßt.

5.2 Einbaubedingungen für die Komponenten

Der Einlauf vor der Düse kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten gestaltet werden.

Bei der Ausführung 1 (Bild 9) befindet sich in jedem Düsenstrang vor der Düse ein kreisrundes Einlaufrohr, dessen Innendurchmesser D mindestens dem vierfachen Düsenhalsdurchmesser d ($D \geq 4d$) entspricht. Die Düse kann vor oder zwischen den beiden Absperrorganen angeordnet werden. Bei der Festlegung des Rohrdurchmessers D des Einlaufrohres vor der Düse muß darauf geachtet werden, daß die Strömungsgeschwindigkeit von 15 m/s nicht überschritten wird. Anderenfalls sollten die dynamischen Anteile bei der Druck- und Temperaturmessung berücksichtigt werden.

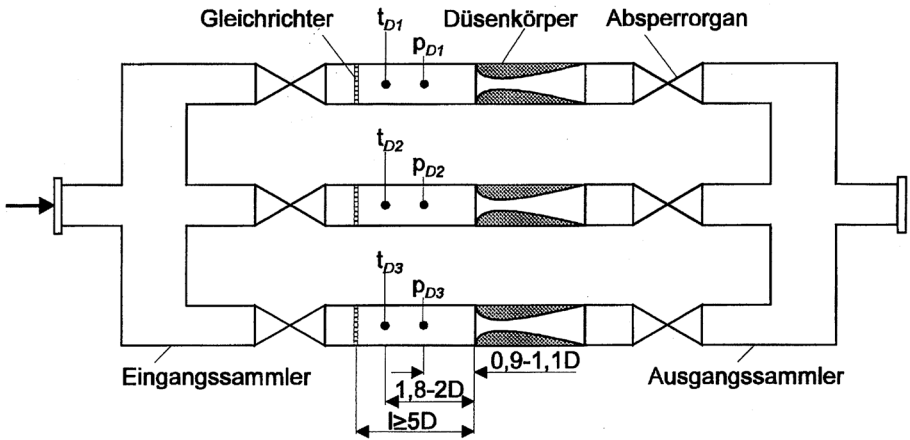


Bild 9: Beispiel für eine Prüfstandskonfiguration nach Ausführung 1 (Düseneinzeleinbau)

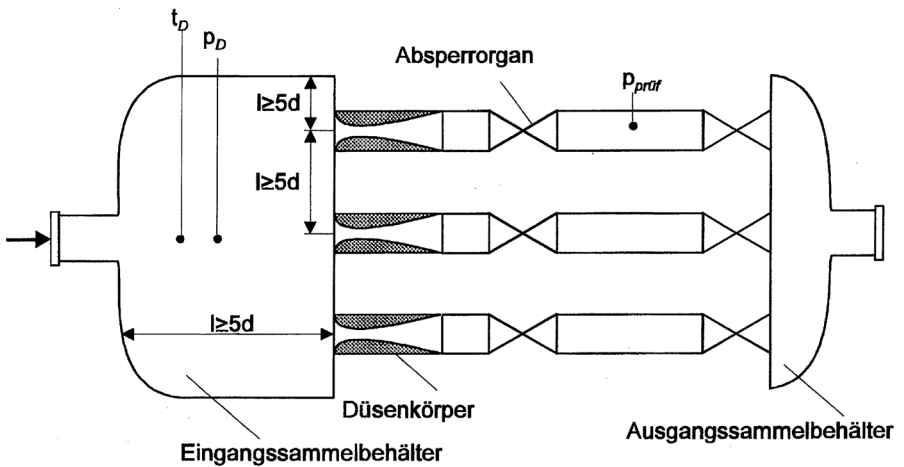


Bild 10: Beispiel für eine Prüfstandskonfiguration nach Ausführung 2 (Düsensammereinbau)

Die Ausführung 2 (Bild 10) basiert auf einem für alle Düsenstränge gemeinsamen Eingangssammelbehälter. Die Düsen sind dabei so in die ebene Grundplatte des Eingangssammlers eingelassen, daß die Stirnfläche der Düse bündig mit ihr abschließt. Dadurch saugt die Düse im physikalischen Sinne aus einem quasi unendlich großen Einlaufraum.

Der Abstand zwischen den Düsen und der Abstand der Behälterwände zur Achse oder Einlaufstirnfläche der Düse muß mindestens den fünffachen Düsenhalsdurchmesser d betragen. Die Anordnung der Düsenstränge und die Gestaltung des Innenraumes des Eingangssammelbehälters muß so ausgeführt werden, daß eine gleichmäßige Anströmung der Düsen gewährleistet ist und keine strömungstechnische Beeinflussung der Düsen untereinander stattfindet.

In jedem Fall (Ausführungen 1 und 2) muß die Strömung vor der Düse drallfrei sein. Werden zur Strömungsberuhigung Gleichrichter verwendet, müssen sie in einem Abstand l von mindestens fünf Rohrlängendurchmessern D vor der Einlaufstirnfläche der Düse installiert werden ($l \geq 5D$).

Die Temperaturmessung muß für Rohrlängendurchmesser $D \geq 50$ mm in einem Abstand von $1,8 D$ bis $2,2 D$, die Druckmessung in einem Abstand von $0,9 D$ bis $1,1 D$ erfolgen. Für Meßstrecken mit kleineren Rohrdurchmessern und den Installationsfall nach Ausführung 2 sind die Temperatur-, Druck- und Feuchtemeßstellen so auszuwählen, daß die Meßwerte die tatsächlichen Bedingungen am Düseneinlauf repräsentieren. Dies gilt insbesondere für die Feuchtemessung, wenn die Prüfluft nicht dem Zustand der Raumluft entspricht, z. B. beim Einsatz von Klimaschränken für die Prüfung von temperaturumwertenden Gaszählern.

In Abhängigkeit von der Bauart des Prüflings ist es zu seinem Schutz (insbesondere bei Großgaszählern) wichtig, daß eine Durchflußänderung durch Öffnen oder Schließen einer Meßstrecke nicht abrupt, sondern langsam geschieht. Dies wird durch langsame Betätigung der Absperrorgane erreicht. Ist dies nicht möglich, z. B. bei elektromagnetisch betätigten Ventilen, kann der Volumenstrom durch Öffnen eines zwischen Prüfstand und Gebläse angeordneten Bypassventiles langsam verringert werden. Die anschließende schlagartige Betätigung der Absperrorgane in den Meßstrecken verursacht nur eine geringe Durchflußänderung und gefährdet den Prüfling nicht. Nach vollendeter Umschaltung der Absperrorgane wird das Bypassventil wieder langsam geschlossen. Der Volumenstrom durch den Prüfstand und den Prüfling erhöht sich bis zum Betriebspunkt.

5.3 Gewährleistung der Dichtigkeit

Damit die Düse dicht gegenüber der Atmosphäre und strömungstechnisch optimal im Prüfstand integriert ist, ist der konstruktiven Gestaltung des Düseninbaus große Bedeutung beizumessen. Die nachfolgenden Bilder 11 und 12 zeigen exemplarisch zwei mögliche Varianten des Düseninbaus. In Bild 11 ist der Düsenkörper in einem Prüfstand mit Einlaufrohr (Ausführung 1) und im Bild 12 in einem Prüfstand mit Eingangssammelbehälter (Ausführung 2) installiert.

Für optimale Strömungsbedingungen ist die kritische Düse zentrisch in das Einlauf- bzw. Auslaufrohr einzusetzen. Das Ausdrehen des Flansches bzw. der Grundplatte auf den Durchmesser des Düsenkragens gewährleistet auch bei Ausbau oder Austausch der Düsen den richtigen Sitz.

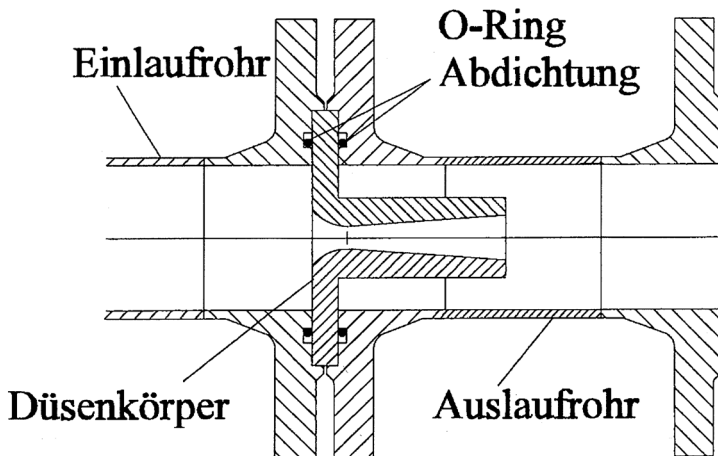


Bild 11: Beispiel für den Einbau des Düsenkörpers in einem Prüfstand mit Einlaufrohr vor der Düse

Eine hohe Sicherheit gegenüber Undichtigkeiten erreicht man insbesondere durch die Verwendung von O-Ringen. Im Gegensatz zu Flachdichtungen haben sie den Vorteil, daß keine Undichtigkeiten aufgrund von Setzerscheinungen auftreten. Ein weiterer Vorteil von O-Ringen ergibt sich aufgrund des Druckunterschiedes zwischen dem Druck im Einbauraum der Düse und dem atmosphärischen Druck. Durch den Druckunterschied legt sich der O-Ring im Betriebsfall stärker an die Dichtflächen an und erhöht damit die Sicherheit des Prüfstandes auf Dichtigkeit.

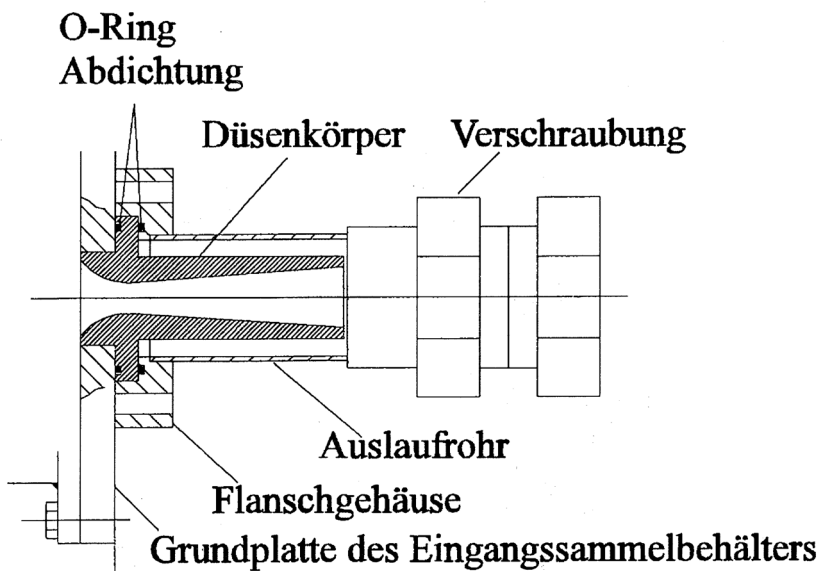


Bild 12: Beispiel für den Einbau des Düsenkörpers in einem Prüfstand mit zylindrischem Eingangssammelbehälter

5.4 Gestaltungsbeispiele

In diesem Abschnitt sollen zwei konkrete Prüfstände vorgestellt werden, die sich in der beschriebenen Gestaltung bereits im praktischen Einsatz bewährt haben.

Bild 13 zeigt einen Prüfstand mit insgesamt acht kritischen Düsen im Bereich von $3 \text{ m}^3/\text{h}$ und $200 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Luft gelangt durch den Prüfling in den zylindrischen Eingangssammler, in dessen ebene Grundplatte die einzelnen Düsenstränge münden. Die Anordnung der im Prüfstand vorhandenen Meßstellen für Temperatur, Druck und Prüflingsimpulse sind dargestellt. Zur Gewährleistung einer sicheren Absperrung der einzelnen Düsenstränge und zur Dichtheitskontrolle sind hinter jeder Düse zwei pneumatisch betätigte Absperrventile installiert, zwischen denen sich jeweils eine Druckmeßstelle befindet. Mit ihr wird sowohl die automatische Dichtheitskontrolle als auch die Überwachung der Einhaltung des kritischen Druckverhältnisses realisiert. Zum stoßfreien Anfahren des Prüflings wird zwischen Ausgangssammler und Sauggebläse ein Bypassventil betrieben. Die Steuerung der Anlage einschließlich der Meßdatenerfassung und -auswertung erfolgt automatisch.

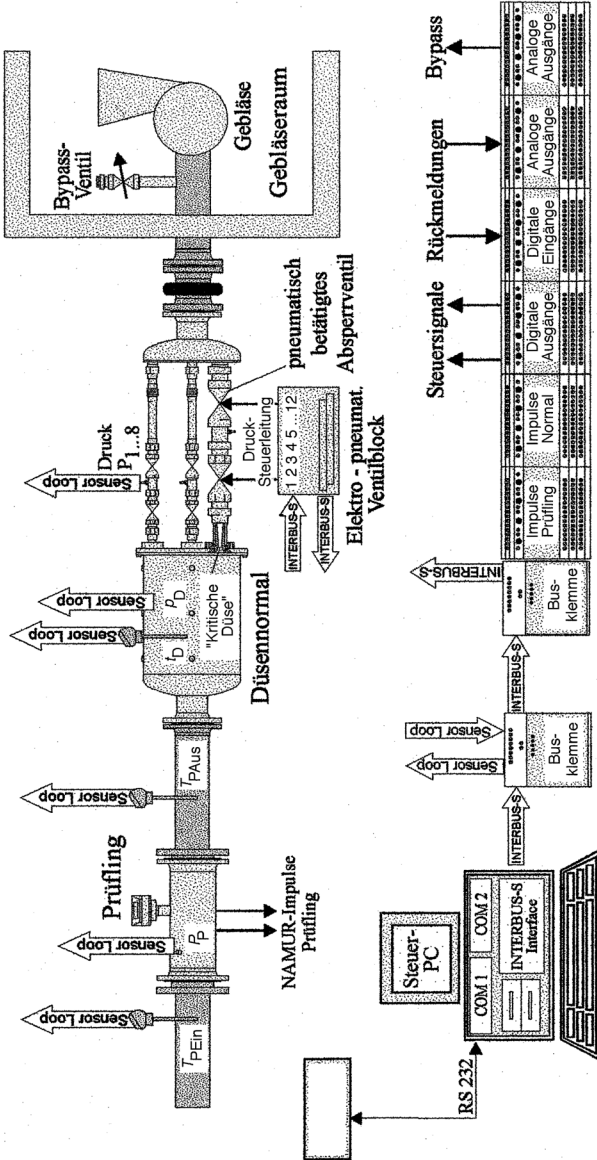


Bild 13: Gestaltungsbeispiel eines Düsenprüfstandes für beliebige Prüfungsbauteile im Volumendurchflußbereich von 3 m³/h bis 200 m³/h

Das zweite Gestaltungsbeispiel (Bild 14) zeigt einen Düsenprüfstand, der speziell für die Beglaubigung von Balgengaszählern der Nenngrößen G 1,6 bis G 25 entwickelt wurde.

Die Prüfstrecke besteht aus einer Einspannvorrichtung für die Prüflinge einschließlich Impulsabgriff, der auf verschiedene Arten (z. B. Abgriff der Magnetkupplung durch Namur-Aufnehmer, Abgriff der Zählwerkrollen durch Reed-Aufnehmer oder Lichttaster) erfolgen kann. Weiterhin enthält sie am Ein- und Ausgang Temperatursensoren zur Ermittlung der Prüflingstemperatur. Die Differenzdrücke können über jedem Prüfling an Schrägrohrmanometern abgelesen werden. Druckschalter lösen bei Überschreitung des maximal zulässigen mechanischen Druckverlustes ein Signal aus.

Anstelle des Prüflings kann auch ein über das PTB-Zeitsignal gesteuerter Impulsgeber zur Überprüfung der Zeitmessung auf jeden beliebigen Prüfplatz aufgeschaltet werden.

Das Prüfnormal enthält die Düsen, die in einer Trägerplatte installiert sind. Diese kann je nach Größe der zu prüfenden Zähler komplett ausgewechselt werden. Zur Erfassung des Zustandes der Prüfluft vor der Düse werden Temperatur, Differenzdrücke, atmosphärische Feuchte und Luftdruck gemessen. Zur schnellen Überprüfung der Sensorik ist das Normal ebenfalls mit Glasthermometer und Schrägrohrmanometer ausgestattet.

Zur Überwachung des kritischen Druckverhältnisses dienen in jedem Düsenstrang angebrachte Druckschalter. Ein weiterer Druckschalter begrenzt den maximal zulässigen Unterdruck des Systems durch Öffnen der Düsenplatte. Zur Vermeidung von Verunreinigungen und Verschleiß an den Düsen ist ein Feinfilter vorgeschaltet.

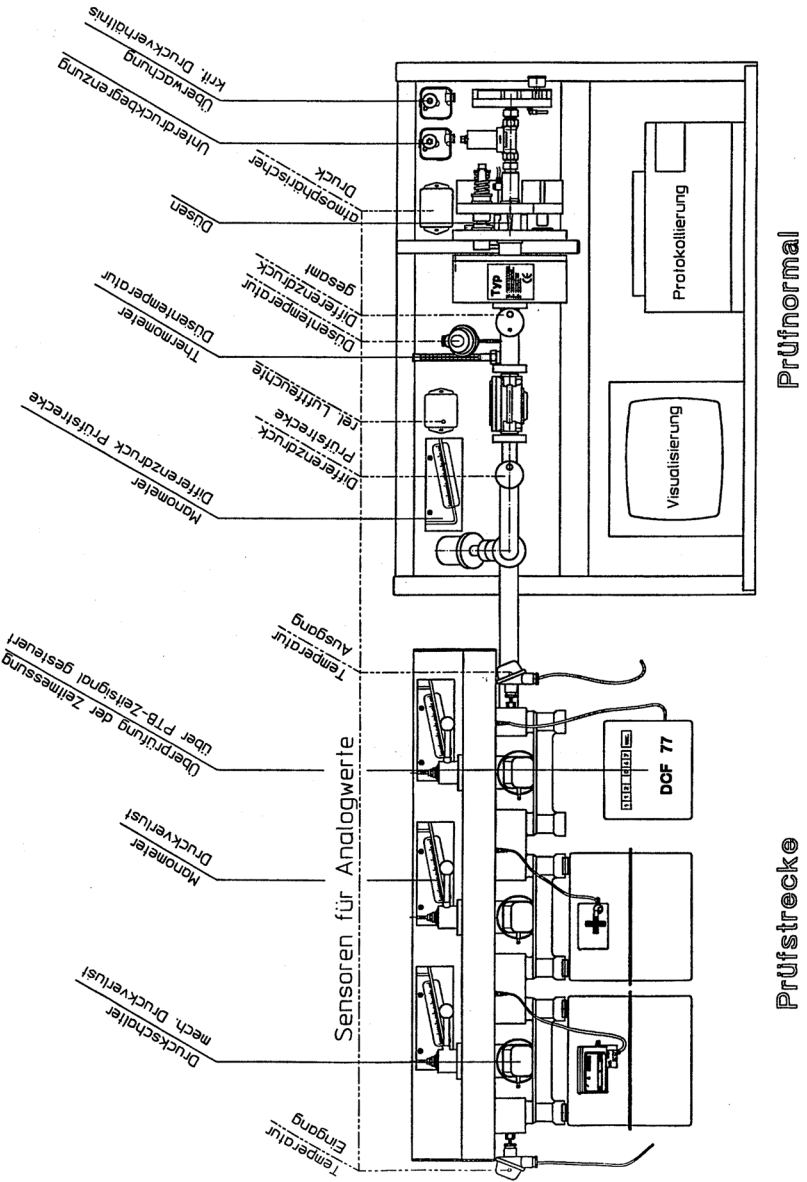


Bild 14: Gestaltungsbeispiel eines Düsenprüfstandes für Balgengaszähler der Nenngrößen G 1,6 bis G 25

6 Abnahme und Überwachung

6.1 Vorbereitung der Abnahme

Für die Abnahme durch die überwachende Behörde wird die Prüfanlage betriebsfertig hergerichtet. Austauschbare Düsen sind auf richtige Kennzeichnung, Beschädigungsfreiheit, Sauberkeit und Korrosionsfreiheit zu überprüfen und in die Anlage einzusetzen. Es muß sichergestellt sein, daß die verwendeten Hilfsmessgeräte den in Kapitel 2 definierten Anforderungen entsprechen. Die Prüfstandsdokumentation (Prüfstandshandbuch mit Beschreibung, Bestandteilen und ggf. Prüfscheinen) ist bereitzuhalten.

6.2 Abnahme

Die Abnahme führt die zuständige überwachende Behörde am Gebrauchsort durch. Dabei werden die Dokumentationen, insbesondere Berechnungen, Spezifikationen und Nachweise gesichtet. Anlagenkennzeichnungen (z. B. Typenschild, Sensorbeschriftungen) sind zu überprüfen.

Die Düsen werden hinsichtlich Kennzeichnung, Material und Zustand überprüft. Die konstruktive Ausführung der Düseneinspannung ist hinsichtlich der Gefahr der Bypassbildung zu untersuchen. Ferner muß nachgewiesen werden, daß alle für amtliche Prüfungen erforderlichen Durchflüsse innerhalb der in den gültigen Prüfrege[n] [2] festgelegten Grenzen des Nenndurchflusses realisierbar sind. Dies gilt sowohl für die Verwendung von Einzeldüsen als auch von Düsenkombinationen.

Sofern die Hilfsmessgeräte nach Kapitel 2.2 bzw. die Aufnehmer noch nicht mit der Signalverarbeitung des Prüfstandes geprüft sind, muß dies im Rahmen der Abnahme nachträglich erfolgen. Wenn nötig, ist die Überlaststabilität bei Differenzdruckaufnehmern nachzuweisen.

Die Einrichtungen zur Überwachung des kritischen Druckverhältnisses (z. B. Druckschalter oder -sensoren) und ggf. zur Vakuumbegrenzung in der Prüfstrecke sind zu überprüfen. Die Anlage ist auf Funktion und Dichtheit zu testen.

Die Überprüfung der Zeitmessung erfolgt über die gesamte Meßkette von der Impulserfassung am Prüfplatz bis zur Auswertung. Statt des Prüflings kann ein mit DCF77 funkgesteuerter bzw. mittelbar geprüfter Impulsgeber an einem beliebigen Prüfplatz Impulse aufschalten, die dann von der Meßsoftware ausgegeben werden.

Die Dichtheit der Anlage (mit Prüfstrecke) ist ebenso wie das Abbrechen des Prüfvorgangs bei Unterschreitung des kritischen Druckverhältnisses zu testen.

Die Software ist hinsichtlich der Prüfabläufe, Grenzwerteingaben, Meßfehlerberechnungen, Protokollierung, Datensicherung und Zugangsberechtigung zu verifizieren. Ist dies bereits vorher an baugleichen Prüfanlagen geschehen, kann auf diese Überprüfung verwiesen werden. Voraussetzung für die Erkennung identischer Software ist die Versionskennzeichnung. Es ist zu überprüfen, daß die zur Berechnung der Meßabweichung erforderlichen Meßdaten abrufbar sind und die Protokollführung den entsprechenden Anforderungen in Abschnitt 4.2 genügt.

Zur Überprüfung der Meßrichtigkeit und Wiederholgenauigkeit der Prüfanlage werden Wiederholungsprüfungen nach den PTB-Prüfregeln „Volumengaszähler“ [2] durchgeführt. Dies sollte mit besonders meßstabilen Prüflingen erfolgen, deren Meßverhalten hinreichend bekannt ist. Dazu sind in der Regel mindestens je zehn Wiederholungsprüfungen mit den benötigten Prüfschritten und -parametern durchzuführen. Danach können durch Wiederholungsprüfungen die eingestellten Prüfvolumina an den beim Betreiber üblicherweise geprüften Zählertypen überprüft bzw. angepaßt werden. In diese Prüfungen sind die jeweils anwendbaren Abtastvorrichtungen für die Volumenerfassung einzubeziehen.

Für die Bewertung der Ergebnisse der Wiederholungsprüfungen gelten ebenfalls die in [2] festgelegten Kriterien (bei Q_{\min} : zweifache Standardabweichung der Meßreihen $\leq 0,6 \%$; bei $0,2 Q_{\max}$ und Q_{\max} : zweifache Standardabweichung der Meßreihen $\leq 0,4 \%$).

Die für die zu prüfenden Zählertypen erforderlichen Prüfabläufe, Prüfvolumina und ggf. notwendige Grenzwerte (z. B. kritisches Druckverhältnis, zulässige Leckrate) sind endgültig festzulegen. Weiterhin wird die zeitliche Abfolge der Nachprüfung der Hilfsmeßgeräte bei der Abnahme festgelegt.

6.3 Überwachung

Eine regelmäßige Überwachung aller Hilfsmeßgeräte hat durch den Betreiber entsprechend den Festlegungen zu erfolgen.

Außerdem ist es zweckmäßig, eine automatische Überwachung der Meßwerterfassung durch Plausibilitätsprüfungen softwaremäßig vorzusehen. Zum Beispiel kann mit vorher definierten, maximal zulässigen Temperaturgrenzen ein fehlerhafter Sen-

sor schnell erkannt werden. Geprüfte Glasthermometer und Breitband- bzw. Schrägröhrmanometer erlauben einen einfachen Vergleich mit den elektronischen Sensoren und sollten zur ständigen Überwachung in der Anlage vorhanden sein.

Die Dokumentation von Abnahme- und Überwachungsmaßnahmen erfolgt im Prüfstandshandbuch gemäß Kapitel 4. Zusätzlich kann das Prüfprogramm selbst das Führen eines elektronischen Notizbuches erlauben.

Nachfolgende Tabelle 12 gibt eine Übersicht der angesprochenen Maßnahmen.

Tabelle 12: Zusammenstellung der Maßnahmen bei Abnahme und Überwachung eines Düsenprüfstandes

Überprüfungstätigkeit	Vorbereitung der Abnahme	Abnahme	Überwachung
Kennzeichnungen und Dokumentation			
Dokumentation (Berechnungen, Spezifikationen, Nachweise)	×	×	
Typenschild, CE-Zeichen, Beschriftungen	×	×	
Düsen			
Kennzeichnung	×	×	
Prüfscheine (Gültigkeitsdauer)	×	×	×
Durchflußbereich (auch alle benötigten Schaltkombinationen)	×	×	
Zustand der Düsen hinsichtlich Beschädigung und Schmutz	×	×	×
Material hinsichtlich Korrosionsbeständigkeit	×		
Hilfsmesßgeräte			
Zeitmessung ggf. in Verbindung mit Impulserfassung	×	×	×
Abtastvorrichtungen	×	×	×
Temperaturaufnehmer	×		× ¹

Fortsetzung Tabelle 12

Druckaufnehmer	×		×
Feuchte- und Drucksensoren (ggf. justieren)	×	×	×
Glasthermometer		×	
Breitband- bzw. Schrägrohrmanometer (ggf. einstellen)	×		×
Druckschalter für die Q_{\min} -Prüfung	×		×
Anlage			
Dichtheit mit und ohne Prüfstrecke nach Abschnitt 7.4	×	×	×
Überwachung des kritischen Druckverhältnisses	×	×	×
Düsenanspannung (Bypassbildung ausschließen)		×	
Software			
Prüfabläufe, Berechnungen, Datensicherung, Protokollierung, und Zugangsberechtigungen ²	×	×	× ³
Software-Beschreibung	×	×	× ³
Meßrichtigkeit und Reproduzierbarkeit			
Wiederholungsmessungen gemäß [2] bzw. Abschnitt 6.2	(×)	×	
Bewertung der Ergebnisse der Wiederholungs- messungen gemäß [2] bzw. Abschnitt 6.2		×	

1 nur wenn geprüfte Normale zur Verfügung stehen

2 nur wenn die Softwareversion noch nicht im Geltungsbereich der zuständigen Behörde überprüft wurde

3 auch bei Software-Update

7 Verwendung kritischer Düsen als Normalgeräte

7.1 Arbeitsgleichungen

Im Falle des Einsatzes kritischer Düsen als Normalgeräte wird sinngemäß wie in Abschnitt 3.2 verfahren, wobei jedoch das Normal, das zur Einmessung der Düsen diente, durch den Prüfling ersetzt wird. Die in Abschnitt 3.2 erläuterten Gleichungen werden nach Q_N umgestellt, Q_N wird entsprechend in Q_P umbenannt. Alle aufgeführten Korrekturen für die Zustandsparameter (Temperatur, Feuchte und Eingangsdruck) der kritischen Düsenströmung sind bei deren Anwendung in gleicher Weise wie bei der Prüfung der Düsen zu erfassen und entsprechend zu berücksichtigen.

Für den Sollwert des Volumendurchflusses am Prüfling $Q_{V,P}$ (Volumendurchfluß des Düsennormals, umgerechnet auf den thermodynamischen Zustand am Prüfling) gilt:

bei Verwendung des Volumenstromes als Düsenkennzahl $Q_{V,20, tr, 1000}$

$$Q_{V,P} = \frac{\rho_D}{\rho_P} \cdot (1 + 0,169 \cdot x_v) \cdot \sqrt{\frac{T_D}{293,15}} \cdot [1 + c_{pE} \cdot (p_D - 1000 \text{ mbar})] \cdot Q_{V,20, tr, 1000} \quad (37)$$

oder bei Verwendung Massestromes als Düsenkennzahl $Q_{m,20, tr, 1000}$

$$Q_{V,P} = \frac{1}{\rho_P} \cdot (1 - 0,210 \cdot x_v) \cdot \sqrt{\frac{293,15}{T_D}} \cdot \frac{p_D}{1000 \text{ mbar}} \cdot [1 + c_{pE} \cdot (p_D - 1000 \text{ mbar})] \cdot Q_{m,20, tr, 1000} \quad (38)$$

Für den Sollwert des Massedurchflusses am Prüfling $Q_{m,P}$ gilt entsprechend:

$$Q_{m,P} = \frac{1}{\rho_P} \cdot (1 + 0,169 \cdot x_v) \cdot \sqrt{\frac{T_D}{293,15}} \cdot [1 + c_{pE} \cdot (p_D - 1000 \text{ mbar})] \cdot Q_{V,20, tr, 1000} \quad (39)$$

oder

$$Q_{m,P} = (1 - 0,210 \cdot x_v) \cdot \sqrt{\frac{293,15}{T_D}} \cdot \frac{p_D}{1000 \text{ mbar}} \cdot [1 + c_{pE} \cdot (p_D - 1000 \text{ mbar})] \cdot Q_{m,20, tr, 1000} \quad (40)$$

Bei Nichtberücksichtigung der Eingangsdruckabhängigkeit, d. h. bei Düsen, die nach Abschnitt 3.2.1. (1-Punkt-Prüfung) geprüft sind, wird $c_{pE} = 0$ gesetzt und als Düsenkennzahlen $Q_{V,20, tr}$ und $Q_{m,20, tr}$ verwendet.

Bei parallelgeschalteten Düsen ergibt sich der Gesamtdurchfluß durch Addition der Teilströme, wobei die unter Umständen unterschiedlichen thermodynamischen Zustände vor den einzelnen Düsen zu berücksichtigen sind.

Kritische Düsen sind Durchflußnormale und geben als unmittelbare Ergebnisgröße immer einen Durchflußwert. Werden das Volumen oder die Masse als Ergebnisgröße benötigt, sind die nach den Gleichungen (36) bis (40) ermittelten Durchflüsse mit der jeweiligen Meßzeit t zu multiplizieren:

$$V_P = Q_{V,P} \cdot \frac{t}{3600 \text{ s}} \quad \text{bzw.} \quad m_P = Q_{m,P} \cdot \frac{t}{3600 \text{ s}}. \quad (41)$$

Wird der Düsenprüfstand zur Ermittlung von Impulswertigkeiten oder anderen Kalibrierdaten des Prüflings benutzt, können die nach (36) bis (40) ermittelten Sollwerte für Durchfluß, Volumen oder Masse unmittelbar verwendet werden. Sind Fehlerkurven für die zu prüfenden Geräte aufzunehmen oder ist eine Prüfung auf Einhaltung der Fehlergrenze durchzuführen, wird die benötigte prozentuale Meßabweichung f_P des Prüflings nach den folgenden Beziehungen ermittelt:

für Prüflinge mit Volumendurchfluß- oder Massedurchflußanzeige

$$f_P = \frac{Q_{V,Ist} - Q_{V,P}}{Q_{V,P}} \cdot 100 \quad \text{bzw.} \quad f_P = \frac{Q_{m,Ist} - Q_{m,P}}{Q_{m,P}} \cdot 100 \quad (42)$$

für Prüflinge mit Volumen- oder Masseanzeige

$$f_P = \frac{V_{Ist} - V_P}{V_P} \cdot 100 \quad \text{bzw.} \quad f_P = \frac{m_{Ist} - m_P}{m_P} \cdot 100, \quad (43)$$

wobei mit dem Index „Ist“ die jeweiligen Anzeigen des Prüflings bezeichnet sind. Sind die geforderten Anzeigen des Prüflings nicht direkt verfügbar, so sind sie aus den zugehörigen Signalen zu berechnen (z. B. durch Multiplikation der während der Messung summierten Impulse mit der zugehörigen Impulswertigkeit, s. Berechnungsbeispiel 7.2).

7.2 Berechnungsbeispiel

An dem folgenden Beispiel soll die Verwendung der in Abschnitt 3.2 und Abschnitt 7.1 eingeführten Gleichungen verdeutlicht werden. Bild 15 zeigt die Beispielkonfiguration mit Prüfling und zwei parallelen Düsen als Normalgerät.

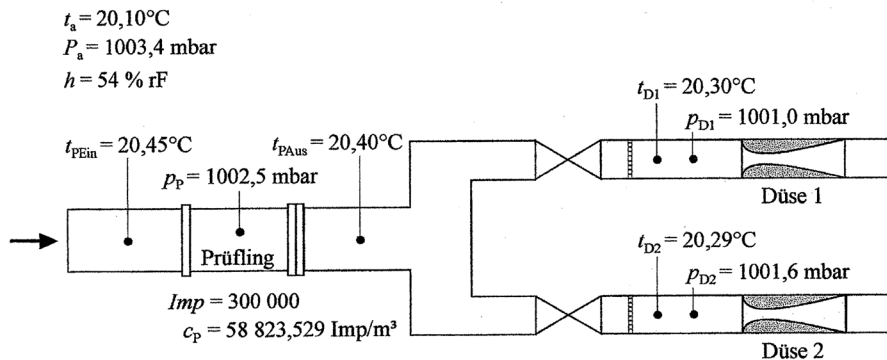


Bild 15: Prüfkongfiguration mit Prüfling, Düsen und Meßstellen für die Sensorik

Die Meßabweichung f_p des Prüflings soll bei einer Prüfbelastung von $Q = 101 \text{ m}^3/\text{h}$ ermittelt werden. Dies wird durch die Parallelschaltung von Düse 1 mit einer Nennprüfbelastung von $Q_{\text{nenn}} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$ und Düse 2 mit einer Nennprüfbelastung von $Q_{\text{nenn}} = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht. Tabelle 13 zeigt die Kenndaten der Düsen, von denen Düse 1 eingangsdruckabhängig ist und Düse 2 nicht.

Tabelle 13: Kenndaten der verwendeten Düsen

Nr.	Q_{nenn}	$Q_{V, 20, \text{tr}}$	$Q_{V, 20, \text{tr}, 1000}$	c_{pE}
	m^3/h	m^3/h	m^3/h	–
Düse 1	1	–	1,0987	$5,4 \cdot 10^{-5}$
Düse 2	100	99,954	–	–

Am Prüfling befinden sich Meßstellen zur Erfassung der Eingangs- und Ausgangs-temperatur t_{PEin} und t_{PAus} sowie des Referenzdruckes p_P . Das durch den Prüfling

geströmte Volumen V_{Ist} wird durch den Zählwerksfortschritt angegeben. Vor den beiden Düsen befinden sich jeweils Meßstellen für die Eingangstemperatur t_{D1} und t_{D2} und des Eingangsdruckes p_{D1} und p_{D2} . Weiterhin werden noch die Prüfraumtemperatur t_a , der Atmosphärendruck p_a , die relative Feuchte h der Prüfluft und die Meßzeit t gemessen. Tabelle 14 zeigt alle erfaßten Meßwerte.

Tabelle 14: Erfasste Meßwerte

Eingangstemperatur am Prüfling	$t_{P \text{ Ein}}$	20,45	°C
Ausgangstemperatur am Prüfling	$t_{P \text{ Aus}}$	20,40	°C
Referenzdruck am Prüfling	p_p	1002,5	mbar
Impulswertigkeit des Prüflings	c_p	58 823,529	Imp/m ³
Impulszahl am Prüfling	Imp	300 000	–
Zählwerksfortschritt am Prüfling	V_{Ist}	5.1	m ³ /h
Eingangstemperatur an der Düse 1	t_{D1}	20,30	°C
Eingangstemperatur an der Düse 2	t_{D2}	20,29	°C
Eingangsdruck an der Düse 1	p_{D1}	1001,0	mbar
Eingangsdruck an der Düse 2	p_{D2}	1001,6	mbar
Prüfraumtemperatur	t_a	21,10	°C
Atmosphärendruck	p_a	1003,4	mbar
relative Feuchte der Prüfluft	h	54	%
Meßzeit	t	179,9	s

Die für die Prüfung verwendete Prüfluft enthält typischerweise Feuchtigkeit, die sowohl in die Berechnung der jeweiligen Dichte ρ_i als auch der kritischen Strömungsfunktion c_s eingeht. Dafür wird zunächst der molare Wasserdampfanteil x_v mit Hilfe der Gleichungen (18) bis (21) berechnet. Aus Gleichung (21) erhält man den Wert für den Druck des gesättigten Wasserdampfes p_{sv} . Anschließend wird mit Gleichung (20) der Korrekturfaktor f , der das veränderte Verhalten feuchter Luft gegenüber einem idealen Gas berücksichtigt, errechnet. Aus diesen beiden Größen sowie der relativen Luftfeuchte h , der Prüfraumtemperatur t_a und dem Atmosphärendruck p_a wird mit den Gleichungen (18) und (19) der molare Wasserdampfanteil x_v bestimmt. Die bisher erhaltenen Ergebnisse sind in Tabelle 15 zusammengefaßt.

Tabelle 15: Zwischenergebnisse für die Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit

Druck des gesättigten Wasserdampfes	p_{sv}	2502,73	Pa
Korrekturfaktor	f	1,004 02	–
molarer Wasserdampfanteil	x_v	0,013 523	–

Mit dem molaren Wasserdampfanteil x_v sowie dem jeweiligen Eingangsdruck p_i und der Temperatur t_i können die entsprechenden Realgasfaktoren vor dem Prüfling Z_p , der Düse 1 Z_{D1} und der Düse 2 Z_{D2} berechnet werden (Tabelle 16 und Gleichung (14)). Der Temperaturwert t_p am Prüfling ergibt sich aus dem arithmetischen Mittelwert aus Eingangs- und Ausgangstemperatur t_{pEin} und t_{pAus} am Prüfling.

Tabelle 16: Zwischenergebnisse der Berechnung der Realgasfaktoren

Realgasfaktor am Prüfling	Z_p	1,019 604	–
Realgasfaktor an der Düse 1	Z_{D1}	1,019 459	–
Realgasfaktor an der Düse 1	Z_{D2}	1,019 462	–

Die Berechnung der jeweiligen Dichte der Prüfluft am Prüfling ρ_p , vor der Düse 1 ρ_{D1} und der Düse 2 ρ_{D2} erfolgt mit den jeweiligen Werten für die Temperatur T_i , den statischen Absolutdruck p_i und den entsprechenden Realgasfaktor Z_i am Prüfling bzw. vor den Düsen. Beim Einsetzen des jeweiligen Meßwertes für die Temperatur in Gleichung (13) muß darauf geachtet werden, daß sie als Absoluttemperatur in Kelvin verwendet wird. Tabelle 17 zeigt die für das Beispiel berechneten Dichtewerte.

Tabelle 17: Zwischenergebnisse der Berechnung der Prüfluftdichte

Dichte am Prüfling	ρ_p	1,160 721	kg/m ³
Dichte vor der Düse 1	ρ_{D1}	1,159 642	kg/m ³
Dichte vor der Düse 2	ρ_{D2}	1,159 642	kg/m ³

Der Gesamtvolumendurchfluß $Q_{v,p}$ am Prüfling ergibt sich aus der Summe der Teilvervolumendurchflüsse $Q_{v1,p}$ und $Q_{v2,p}$ durch Düse 1 und 2. Die Berechnung von $Q_{v1,p}$ und $Q_{v2,p}$ geschieht mit Gleichung (36). Da Düse 2 nicht eingangsdruckabhängig ist,

muß in Gleichung (36) die Düsenkennzahl $Q_{V,20, tr, 1000}$ (2-Punkt-Kalibrierung) durch die Düsenkennzahl $Q_{V,20, tr}$ (1-Punkt-Kalibrierung) ersetzt werden. Weiterhin wird $c_{pE} = 0$ gesetzt. Die Berechnungsergebnisse für die beiden Volumendurchflüsse $Q_{V1, P}$ und $Q_{V2, P}$ sowie den Gesamtvolumendurchfluß am Prüfling $Q_{V, P}$ sind in Tabelle 18 angegeben.

Tabelle 18: Ergebnisse der Volumendurchflußberechnungen

Teilvolumendurchfluß am Prüfling	$Q_{V1, P}$	1,100 810	m ³ /h
Teilvolumendurchfluß am Prüfling	$Q_{V2, P}$	100,2020	m ³ /h
Gesamtvolumendurchfluß am Prüfling	$Q_{V, P}$	101,3028	m ³ /h

Da zur Berechnung der Meßabweichung f_p des Prüflings das vom Prüfling angezeigte Volumen V_{ist} mit dem tatsächlich durch den Prüfling geströmten Volumen V_p verglichen wird, muß dieses durch Multiplikation des Volumendurchflusses am Prüfling $Q_{V, P}$ mit der Messzeit t (dividiert durch 3600 s zur Anpassung der Zeiteinheiten gemäß Gleichung (40)) berechnet werden. Für das tatsächlich durch den Prüfling geströmte Volumen ergibt sich ein Wert von $V_p = 5,065$ m³/h.

Die Meßabweichung f_p des Prüflings erhält man dann mit Gleichung (42). Für dieses Beispiel wird eine Meßabweichung $f_p = 0,688$ % errechnet.

7.3 Betriebsweise

Kritische Düsen sind Durchflußmeßgeräte. Sie sollten vorzugsweise kontinuierlich und nicht statisch (im Start-Stopp-Regime) betrieben werden.

Zu Beginn der Durchströmung einer kritischen Düse ist zunächst eine gewisse Zeit zur Beschleunigung der Gasströmung auf Schallgeschwindigkeit und Herstellung ausgeglichener Druckverhältnisse im gesamten Rohrleitungssystem (einschließlich der Zuleitungen zu den Druckmeßgeräten) erforderlich. Wichtiger ist jedoch die Ausbildung eines thermischen Gleichgewichtszustandes innerhalb der Düsenströmung. Erfahrungsgemäß ist eine Vorlaufzeit von 20 s bis 30 s ausreichend, um Durchflußänderungen der Düse auf Grund thermischer Ausgleichsprozesse unterhalb der nachweisbaren Meßunsicherheit zu halten. Gegebenenfalls sind, auch unter Einbeziehung der Prüflinge, entsprechende Untersuchungen durchzuführen.

Sollten es spezielle Meßaufgaben erfordern, den Prüfling nicht mit fliegendem Start-Stopp zu betreiben, sind folgende zwei Fälle möglich:

- Durch die Verwendung einer Dreivegehahn-Kombination kann eine kontinuierliche Düsenströmung aufrechterhalten werden, indem während der Meßpausen die Prüfluft über einen Bypass angesaugt und nur während der Messung über den Prüfling geleitet wird.
- Andernfalls ist durch spezielle Untersuchungen festzustellen, welche (verlängerten) Prüfzeiten für die einzelnen Prüfdurchflüsse erforderlich sind, um den Fehler einfluß durch die Anpassungseffekte der Düsenströmung ausreichend gering zu halten.

In jedem Fall ist die angewandte Verfahrensweise bei der Erteilung der Betriebsgenehmigung festzuhalten, und es sind entsprechende Festlegungen/Auflagen zu fixieren.

7.4 Durchführung der Dichtheitsprüfung

7.4.1 Äußere Dichtheit

Bei der Prüfung auf äußere Dichtheit werden vor Beginn der Zählerprüfung der Prüfling, die Rohrleitung zwischen Prüfling und Düsennormal, das Düsennormal sowie die angeschlossenen Druckmeßgeräte auf Dichtheit gegenüber der Atmosphäre überprüft.

Für einen Prüfstand im Saugbetrieb gilt dabei folgendes: Der Prüfling ist zunächst an seinem Eingang, z. B. mit einem Blindflansch, zu verschließen. Zwischen ihm und den hinteren Absperrorganen entsteht somit über die gesamte Prüfeinrichtung ein abgeschlossenes Sperrvolumen, das im weiteren mit V_e (eingeschlossenes Volumen) bezeichnet wird. Die in diesem Sperrvolumen einzustellende Druckdifferenz, in weiteren Prüfdruck $p_{\text{prüf}}$ genannt, sollte sich in Art und Größe nach dem Betriebsdruck des Prüfstandes richten, beim Saugbetrieb sollte der Prüfdruck also vorzugsweise ein Unterdruck gegenüber dem Atmosphärendruck sein. Dieser Unterdruck sollte zwischen dem ein- und dreifachen maximalen Betriebsunterdruck liegen und sollte mindestens 10 mbar betragen.

Nach Einstellen des Prüfdruckes ist vor Beginn der Dichtheitsprüfung zur Temperaturangleichung eine Wartezeit von mindestens zwei Minuten vorzusehen. Mit Hilfe eines

geeigneten Thermometers ist zu überprüfen, daß sich die Temperatur innerhalb des Sperrvolumens während der Dichtheitsprobe nicht mehr als um 0,1 K verändert.

Die Dichtheitsprüfung selbst besteht in der Messung der Änderung des Prüfdruckes $\Delta p_{\text{prüf}}$ im Sperrvolumen während einer definierten Zeit Δt , wobei folgende Größen-gleichung gilt:

$$\frac{\Delta p_{\text{prüf}}}{\Delta t} = \frac{Q_{L\text{mess}} \cdot p_{\text{prüf}}}{V_e} \quad (44)$$

Die entsprechende aktuelle Leckrate $Q_{L\text{mess}}$ berechnet sich aus den gemessenen Werten dann zu

$$Q_{L\text{mess}} = \frac{\Delta p_{\text{prüf}} \cdot V_e}{p_{\text{prüf}} \cdot \Delta t} \quad (45)$$

In Anlehnung an die in den gültigen PTB-Prüfregeln für Volumengaszähler [2] getroffenen Festlegungen beträgt die maximal zulässige Leckrate $Q_{L\text{zul}}$ für Balgengaszähler 0,3 % des minimalen Volumendurchflusses Q_{min} , für alle übrigen Zählerbauarten 0,1 % von Q_{min} . Die Dichtheitsprüfung ist so anzulegen, daß die zulässige Leckrate $Q_{L\text{zul}}$ eine Änderung des Prüfdruckes $\Delta p_{\text{prüf}}$ von mindestens den in Tabelle 19 angegebenen Werten im Sperrvolumen verursacht.

Tabelle 19: Zulässige Leckraten und Mindestdruckänderungen für die Dichtheitsprüfung

	maximal zulässige Leckrate $Q_{L\text{zul}}$	$\Delta p'_{\text{prüf}}$ im Sperrvolumen mindestens
Balgengaszähler	0,003 Q_{min}	0,2 mbar
Drehkolben-, Turbinenrad-, Wirbel- gaszähler und sonstige Durchflußmesser	0,001 Q_{min}	1,0 mbar

Die entsprechende Mindestprüfzeit ist nach der folgenden Gleichung zu berechnen, sollte aber mindestens eine Minute betragen.

$$\Delta t_{\min} = \frac{\Delta p'_{\text{pruef}} \cdot V_e}{p_{\text{pruef}} \cdot Q_{L\text{zul}}} \quad (46)$$

Ist die während der Dichtheitsprobe gemessene Leckrate $Q_{L\text{mess}}$ kleiner oder gleich der vorgegebenen, maximal zulässigen Leckrate $Q_{L\text{zul}}$, gilt der Prüfstand als dicht.

Das folgende Zahlenbeispiel soll diese Forderungen und Berechnungen veranschaulichen:

Gegenstand der Dichtheitsprüfung: Reihenprüfstand mit fünf Prüfplätzen für Balgengaszähler der Größe G 4.

Für die Berechnungen werden folgende Angaben zum Prüfstand und den Prüflingen benötigt:

- *eingeschlossenes Volumen V_e :*

Meßrauminhalt der Prüflinge ($5 \cdot 2 \text{ dm}^3$) 10 dm^3

Volumen des Düsenraumes 10 dm^3

Volumen aller Verbindungsleitungen 30 dm^3

$$V_e = 50 \text{ dm}^3$$

- *maximal zulässige Leckrate $Q_{L\text{zul}}$:*

für Balgengaszähler G 4 beträgt $Q_{\min} = 40 \text{ dm}^3/\text{h}$

gemäß Tabelle 19 ergibt sich $Q_{L\text{zul}} = 0,003 \cdot 40 \text{ dm}^3/60 \text{ min} = 0,002 \text{ dm}^3/\text{min}$

- *Mindestprüfzeit Δt_{\min} , um für $Q_{L\text{zul}}$ die geforderte Mindestdruckänderung im Sperrvolumen zu garantieren:*

gemäß Gleichung (45) und Tabelle 19 gilt:

$$\Delta t_{\min} = 0,2 \text{ mbar} \cdot 50 \text{ dm}^3 / (1000 \text{ mbar} \cdot 0,002 \text{ dm}^3/\text{min}) = 5 \text{ min.}$$

Die aktuell durchgeführte Dichtheitsprüfung ergab einen Druckabfall von 0,1 mbar in fünf Minuten. Gemäß Gleichung (44) beträgt die gemessene Leckrate $0,001 \text{ dm}^3/\text{min}$, was unterhalb der maximal zulässigen Leckrate liegt. Die Prüfanordnung gilt damit als dicht.

Es ist zulässig, die Dichtheitsprüfung an Prüfständen in mehreren Teilabschnitten durchzuführen, wobei die algebraische Summe aller gemessenen Einzelleckraten die oben angegebene zulässige Leckrate $Q_{L\text{zul}}$ nicht überschreiten darf. Es sind auch andere Verfahren zur Überprüfung der Dichtheit zulässig, wenn der Nachweis einer sicheren Einhaltung der o. g. Leckraten erbracht wird.

Erlaubt es die konstruktive Ausführung des Prüfstandes nicht, die Dichtheitsprüfung mit Unterdruck durchzuführen, ist auch eine Prüfung mit Überdruck zulässig. Es gelten dann sinngemäß alle genannten zahlenmäßigen Forderungen. Es ist jedoch sicherzustellen, daß die dichtheitsrelevanten Teile der Anlage (z. B. Dichtungen, Armaturen usw.) keine andere Auswirkung als bei Unterdruck aufweisen.

Anhang D enthält eine ausführliche Beschreibung für den konkreten Ablauf einer Prüfung der äußeren Dichtheit.

7.4.2 Innere Dichtheit

Für alle Düsenprüfstände, die mit mehreren parallelen Düsensträngen ausgerüstet sind und bei denen während eines Prüfzyklus unterschiedliche Einzeldüsen zum Einsatz kommen, ist neben der Prüfung der äußeren Dichtheit auch eine Prüfung der inneren Dichtheit erforderlich. Diese soll ausschließen, daß sich durch Undichtheiten an geschlossenen Düsensträngen ein ungewollter Nebenfluß, parallel zum Hauptdurchfluß, einstellt.

Vorzugsweise sollte jeder Düsenstrang in einem solchen Prüfstand mit einer Doppelabspernung aus zwei nacheinander angeordneten Absperrorganen ausgerüstet sein. Zwischen den beiden Absperrorganen entsteht bei geschlossenem Düsenstrang ein Sperrvolumen. Zur Prüfung der inneren Dichtheit wird dieses Sperrvolumen mit einem Überdruck zum Betriebsdruck vor und hinter der Düse beaufschlagt. Bei Undichtheit der Absperrorgane oder der Verbindungen zwischen ihnen, die zu einem unerwünschten Nebenfluß und damit zu einem Fehler im Meßergebnis führen würden, erfährt der Differenzdruck in der Sperrstrecke eine detektierbare Änderung.

Die innere Dichtheit der Düsenstränge ist dann gegeben, wenn sich während der Prüfzeit, in der die Sperrstrecke geschlossen ist, der Druck in der Sperrstrecke nicht um mehr als eine maximal zulässige Druckdifferenz $\Delta p_{\text{prüf}}$ ändert. Für die Ermittlung der entsprechenden Zahlenwerte gelten sinngemäß die Anforderungen aus Abschnitt 7.4.1.

Es ist auch zulässig, die Überprüfbarkeit der inneren Dichtheit durch andere konstruktive Lösungen oder spezielle Auslegungen der Düsen zu ermöglichen bzw. innere Undichtheiten konstruktiv auszuschließen. Die Notwendigkeit einer gesonderten Prüfung der inneren Dichtheit entfällt zum Beispiel, wenn bei immer wiederkehrendem Prüfablauf für die gleiche Gaszählerbauart (gleiche Prüfpunkte in gleichbleibender, durchflußmäßig aufsteigender Reihenfolge) die erforderlichen Durchflüsse jeweils nur durch Zuschalten einer weiteren Düse als Summe der dann geöffneten Dü-

sen realisiert werden, wobei während des gesamten Prüfzyklus kein einziger Düsenstrang geschlossen wird. Die Überprüfung der Dichtheit der einzelnen Düsenstränge ist dann automatisch Bestandteil der Prüfung auf äußere Dichtheit. Ebenso sind Spezialarmaturen zur Absperrung der Düsenstränge einsetzbar, die intern eine Überprüfung ihrer Dichtheit ermöglichen und zur Anzeige bringen können.

Ob und in welchen Abständen die innere Dichtheit zu prüfen ist, ist bei der Erteilung der Betriebsgenehmigung durch die zuständige Eichbehörde festzulegen.

In Anhang D ist ebenfalls der Ablauf einer Prüfung auf innere Dichtheit ausführlich beschrieben.

8 Verwendete Formelzeichen

8.1 Für die theoretischen Beschreibungen in Kapitel 1

Formelzeichen	Erläuterung
A_d	Fläche des engsten Düsenquerschnitts
A_2	Fläche des Austrittsquerschnittes der Düse
a, b, n	Kennzahlen zur Berechnung des Düsenbeiwertes als Funktion von Re_d
c	Düsenbeiwert
c_*	kritische Strömungsfunktion
d	Düsendurchmesser im engsten Düsenquerschnitt
D	Rohrleitungsdurchmesser
L_{Diff}	Diffusorlänge
p_0	absoluter Ruhedruck
p_2	absoluter Druck am Düsenausgang
Q_m	Massedurchfluß
Q_v	Volumendurchfluß
r_c	Radius des Einlauf-Viertelkreises der Düse
r_*	kritisches Druckverhältnis
R_a	Oberflächenrauigkeit
R	spezifische Gaskonstante
Re_d	Reynoldszahl im engsten Düsenquerschnitt
T_0	absolute Ruhetemperatur
α_{Diff}	Diffusorhalbwinkel
κ	Isentropenexponent

8.2 Für die Arbeitsgleichungen und Berechnungsbeispiele in den nachfolgenden Kapiteln

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
A	–	Auflösung der Meßgeräteanzeige
A_d	mm ²	Fläche des engsten Düsenquerschnitts
c	–	Düsenbeiwert
c_p	1/m ³	Impulswertigkeit
c_{pE}	1/mbar	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Reynoldszahlabhängigkeit des Düsenbeiwertes
c'	m ³ /mbar · h	Zwischenwert zur Berechnung von c_{pE}
c_*	–	kritische Strömungsfunktion
D	mm	Rohrdurchmesser
d	mm	Düsendurchmesser im engsten Querschnitt
d_1	mm	Durchmesser des Düseneinlaufs
d_2	mm	Durchmesser des Düsenaustritts
d^*	mm	Schätzwert für den Düsendurchmesser
f	–	Korrekturfaktor für das veränderte Verhalten der feuchten Luft im Vergleich mit einem idealen Gas
f_N	%	Meßabweichung des Normalzählers
f_p	%	Meßabweichung des Prüflings
h	%	relative Luftfeuchtigkeit
Imp	–	Impulszahl
l	mm	freier Abstand vor dem Düseneinlauf
L_{Diff}	mm	Diffusorlänge
L_{Ges}	mm	Düsengesamtlänge
M_a	kg/mol	molare Masse der trockenen Luft: 28,9635 · 10 ⁻³ kg/mol [6]

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
M_v	kg/mol	molare Masse von Wasserdampf: 18,015 · 10 ⁻³ kg/mol [6]
m_{Ist}	kg	Anzeige eines Massezählers bei der Prüfung
m_p	kg	Masse des Düsennormal
p_a	mbar	Atmosphärendruck
$p_{D, \text{max}}$	mbar	oberer Düseneingangsdruckwert bei einer 2-Punkt-Prüfung
$p_{D, \text{min}}$	mbar	unterer Düseneingangsdruckwert bei einer 2-Punkt-Prüfung
p_i	mbar	maßgebender Absolutdruck (am Normal, Prüfling bzw. vor der Düse)
$p_{\text{prüf}}$	mbar	Druckdifferenz im Sperrvolumen bei der Dichtheits- prüfung
$\Delta p_{\text{prüf}}$	mbar	Druckänderung im Sperrvolumen bei der Dichtheits- prüfung
$\Delta p'_{\text{prüf}}$	mbar	Mindestdruckänderung im Sperrvolumen bei der Dichtheitsprüfung
p_{sv}	Pa	Druck des gesättigten Wasserdampfes
$Q_{L, \text{mess}}$	m ³ /h	gemessene Leckrate
$Q_{L, \text{zul}}$	m ³ /h	maximal zulässige Leckrate
$Q_{m, \text{Ist}}$	kg/h	Anzeige eines Massedurchflußmessers bei der Prüfung
$Q_{m, P}$	kg/h	Massestrom des Düsennormal
$Q_{m, 20, \text{tr}}$	kg/h	„vereinfachte“ Düsenkennzahl (Massedurchfluß) für 20 °C, 0 % rel. Feuchte
$Q_{m, 20, \text{tr}, 1000}$	kg/h	Düsenkennzahl (Massedurchfluß) für 20 °C, 0 % rel. Feuchte, 1000 mbar Eingangsdruck
Q_{max}	m ³ /h	maximaler Volumendurchfluß eines Gaszählers
Q_{min}	m ³ /h	minimaler Volumendurchfluß eines Gaszählers

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
Q_N	m ³ /h	korrigierter Volumendurchfluß am Normalzähler
Q_{nenn}	m ³ /h	Nennvolumendurchfluß
$Q_{V, \text{Ist}}$	m ³ /h	Anzeige eines Volumendurchflußmessers bei der Prüfung
$Q_{V, P}$	m ³ /h	Volumendurchfluß des Düsennormal, umgerechnet auf den Zustand am Prüfling
$Q_{V, 20, \text{tr}}$	m ³ /h	„vereinfachte“ Düsenkennzahl (Volumendurchfluß) für 20 °C, 0 % rel. Feuchte
$Q_{V, 20, \text{tr}, 1000}$	m ³ /h	Düsenkennzahl (Volumendurchfluß) für 20 °C, 0 % rel. Feuchte, 1000 mbar Eingangsdruck
$Q_{V, 20, \text{tr}, \text{max}}$	m ³ /h	Volumendurchfluß für den oberen Düseneingangsdruckwert bei einer 2-Punkt-Prüfung
$Q_{V, 20, \text{tr}, \text{min}}$	m ³ /h	Volumendurchfluß für den unteren Düseneingangsdruckwert bei einer 2-Punkt-Prüfung
R	J/(kg · K)	spezifische Gaskonstante
R_0	J/(mol · K)	universale (molare) Gaskonstante: 8,314 41 J/(mol · K) [6]
r_c	mm	Radius des Einlauf-Viertelkreises der Düse
T_i	K	maßgebende Absoluttemperatur (am Normal, Prüfling bzw. vor der Düse)
t	s	Meßzeit
t_a	°C	Umgebungstemperatur
t_i	°C	maßgebende Celsius-Temperatur (am Normal, Prüfling bzw. vor der Düse)
t_r	°C	Taupunkttemperatur
Δt	min	Zeitintervall für die Dichtheitsprüfung
Δt_{min}	min	Mindestzeitintervall für die Dichtheitsprüfung
u		Standardmeßunsicherheit

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
V_e	m^3	eingeschlossenes Volumen (Sperrvolumen) bei der Dichtheitsprüfung
V_{Ist}	m^3	Anzeige eines Volumengaszählers bei der Prüfung
V_N	m^3	unkorrigierte Volumenanzeige am Normalzähler
V_P	m^3	Volumen des Düsennormal, umgerechnet auf den Zustand am Prüfling
x_v	–	molarer Anteil des Wasserdampfes in feuchter Luft
Z_i	–	Realgasfaktor
α_{Diff}	°	Diffusorhalbwinkel
κ	–	Isentropenexponent
η	$Pa \cdot s$	dynamische Viskosität
ρ_i	kg/m^3	Dichte der feuchten Luft am Zähler bzw. an der Düse

Erläuterung zur Verwendung des Index „i“:

Der Index „i“ steht für die Kennzeichnung des thermodynamischen Zustandes am jeweiligen Meßgerät, wobei im einzelnen

D – für den Zustand vor der Düse

N – für den Zustand am Normalzähler

P – für den Zustand am Prüfling

stehen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Gesetz über das Meß- und Eichwesen (Eichgesetz) Neufassung vom 23.3.1992, BGBl. I, S. 711
- [2] PTB-Prüfregeln Band 4: Volumengaszähler. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin, 1982
- [3] International Standard ISO 9300: Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles. First Edition, ISO 1990
- [4] *Aschenbrenner, A.*: The influence of humidity on the flowrate of air through critical flow nozzles. Proceedings of FLOMEKO 1983, Budapest/Hungary, North-Holland Publishing Company Amsterdam – New York – Oxford, S. 71–74
- [5] Technische Richtlinie der PTB G 15. Prüfung von Drehkolbengaszählern. 1997
- [6] *Giacomo, P.*: Formel für die Bestimmung der Dichte von feuchter Luft. In: PTB-Mitteilungen 89, 4/79, S. 271 ff.

Anhang A

Beispiel für die experimentelle Bestimmung des kritischen Druckverhältnisses einer Düse

Eine kritische Düsenströmung zeichnet sich insbesondere dadurch aus, daß sich nach dem Erreichen des kritischen Strömungszustandes ein stabiler, unveränderlicher Durchfluß durch die Düse einstellt. Realisiert wird ein solcher Strömungszustand – wie in Kapitel 1 beschrieben –, wenn das Verhältnis des Absolutdruckes nach der Düse p_2 zum Absolutdruck vor der Düse p_0 das sogenannte kritische Druckverhältnis $(p_2/p_0)_{kr}$ unterschreitet.¹

Das folgende Beispiel zeigt eine Möglichkeit der experimentellen Ermittlung des kritischen Druckverhältnisses für eine Düse, die im Saugbetrieb arbeitet. Dabei wird die Abhängigkeit des Durchflusses vom Druckverhältnis untersucht. Der jeweilige Durchfluß der Düse wird in Anlehnung an das in Kapitel 3 beschriebene Verfahren zur Ermittlung der Düsenkennzahl bestimmt. Die Düse wird dafür an ein Volumen- oder Durchflußmeßgerät angeschlossen, das in diesem Fall nicht unbedingt ein Normalgerät höherer Ordnung sein muß, hinsichtlich Meßunsicherheit und insbesondere Reproduzierbarkeit aber der Aufgabe angemessen sein sollte.

Typischerweise wird eine Meßreihe damit begonnen, daß zunächst der kleinste, mit dem vorhandenen Versorgungssystem (Vakuumpumpe, Unterdruckgebläse) realisierbare Druck am Düsenausgang eingestellt und der zugehörige Durchfluß bestimmt wird. Da eine solche Untersuchung unter Umständen einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen kann, ist hierfür zweckmäßigerweise die Düsenkennzahl $Q_{20, tr, 1000}$ oder $Q_{20, tr}$ zu verwenden.

Der Druck nach der Düse wird nun schrittweise erhöht. Arbeitet die Düse kritisch, bleibt der Durchfluß (die Düsenkennzahl) zunächst konstant. Wird das kritische Druckverhältnis erreicht bzw. überschritten, nimmt der Durchfluß ab. Der festgestellte Wert des Druckverhältnisses, von dem an sich der Durchfluß beginnt zu ändern, ist das gesuchte kritische Druckverhältnis.

1 Wie in Abschnitt 3.2 bereits erläutert, werden für praktische Untersuchungen und Berechnungen anstelle der Ruhebedingungen T_0 und p_0 die am Düseneingang gemessenen Werte T_D und p_D verwendet. In den weiteren Beschreibungen über die Bestimmung des kritischen Druckverhältnisses erscheint deshalb p_D als maßgebender Düsendruck.

Die nachfolgende Tabelle A-1 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung des kritischen Druckverhältnisses für zwei Düsen mit Nenndurchflüssen von 47 dm³/h (Düsenedurchmesser ca. 0,27 mm) und 1,9 m³/h (Düsenedurchmesser ca. 1,89 mm). Die zugehörigen Graphiken sind in Bild A-1 gezeigt. Sowohl in der Tabelle als auch in der Graphik ist deutlich zu erkennen, wann der relative, auf den maximalen Durchfluß bei kleinstem Meßunterdruck nach der Düse bezogene Durchfluß beginnt abzunehmen. Für die kleinere der beiden Düsen (0,27 mm Durchmesser) liegt das kritische Druckverhältnis $(p_2/p_D)_{kr}$ bei etwa 0,52, für die größere Düse (1,89 mm Durchmesser) bei etwa 0,71.

Um beim praktischen Einsatz der Düsen die Einhaltung des kritischen Druckverhältnisses sicherzustellen, sollte stets mindestens 5 % unter den ermittelten Druckverhältnissen gearbeitet werden.

Tabelle A-1: Ergebnisse der experimentellen Bestimmung des kritischen Druckverhältnisses für zwei Düsen mit Nenndurchflüssen von 47 dm³/h und 1,9 m³/h

Düse 0,27 mm			Düse 1,89 mm		
p_2/p_D	$Q_{20, tr}$	Q_{rel}	p_2/p_D	$Q_{20, tr}$	Q_{rel}
	dm ³ /h			m ³ /h	
0,020	46,910	1,000	0,453	1,8964	1,000
0,099	46,913	1,000	0,512	1,8966	1,000
0,199	46,904	1,000	0,564	1,8966	1,000
0,297	46,900	1,000	0,614	1,8966	1,000
0,396	46,905	1,000	0,662	1,8964	1,000
0,493	46,910	1,000	0,694	1,8963	1,000
0,510	46,900	1,000	0,707	1,8960	1,000
0,527	46,875	0,999	0,715	1,8946	0,999
0,538	46,767	0,997	0,741	1,8862	0,995
0,575	46,360	0,988	0,782	1,8667	0,984
0,615	45,715	0,975	0,815	1,8327	0,966
0,690	43,550	0,928	0,838	1,7821	0,940

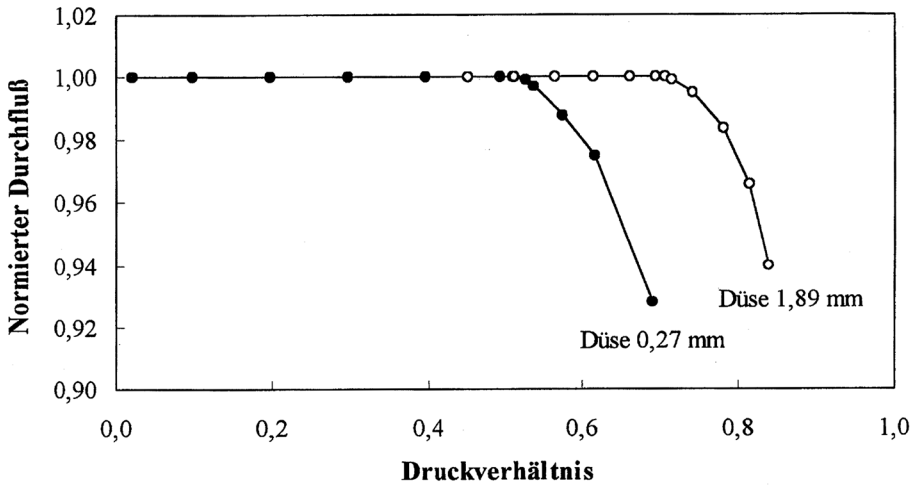


Bild A-1: Graphische Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Bestimmung des kritischen Druckverhältnisses für zwei Düsen mit Nenndurchflüssen von 47 dm³/h und 1,9 m³/h

Anhang B

Beispiel für die Berechnung der Meßunsicherheit der Düsenkennzahl $Q_{V,20, tr}$ bei einer Prüfung der Düse im Einbauzustand

Grundsätzliche Bemerkungen

Die Ermittlung der Meßunsicherheit hat entsprechend der gültigen Fassung der DIN 1319-3 „Grundlagen der Meßtechnik. Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße. Meßunsicherheit“ vom Mai 1996 [B1] zu erfolgen, die hinsichtlich der Behandlung und Angabe der Meßunsicherheit eines Meßergebnisses den internationalen Empfehlungen „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (ISO, 1995) [B2] angepaßt wurde. Gemäß der genannten Norm DIN 1319-3 sollte die Auswertung von Messungen und damit auch die Ermittlung der Meßunsicherheit in vier Einzelschritten ausgeführt werden:

1. Aufstellung eines Modells, das die Beziehung der interessierenden Meßgröße (Ergebnisgröße) zu allen anderen beteiligten Größen (Eingangsgrößen) mathematisch beschreibt
2. Vorbereitung der gegebenen Meßwerte und anderer verfügbarer Daten
3. Berechnung des Meßergebnisses und der Meßunsicherheit der Ergebnisgröße aus den vorbereiteten Daten mittels des Modells
4. Angabe des vollständigen Meßergebnisses der Ergebnisgröße.

Allgemeiner Ablauf einer Meßunsicherheitsermittlung

Zunächst ist der Meßvorgang komplett zu analysieren. Alle Meßgrößen, Zusammenhänge, Abläufe und Einflüsse sind hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Ergebnisgröße hin zu betrachten. Entsprechend des so erarbeiteten Modells ist die vollständige Bestimmungsgleichung für die Ergebnisgröße $Y = f(X_1, \dots, X_m)$ aufzustellen, die neben dem mathematischen Zusammenhang der Eingangsmeßgrößen möglichst bereits alle Korrektur- und Einflußgrößen einschließt. Zweckmäßigerweise sollten bekannte Einflußgrößen und Korrekturen dabei als eigene Eingangsgrößen betrachtet und entsprechend ihrer mathematischen Verknüpfungen in die Bestimmungsgleichung aufgenommen werden.

Danach ist für jede Eingangsgröße X_i die zugehörige Meßunsicherheit $u(x_i)$ zu ermitteln. Im allgemeinen werden dafür die jeweiligen empirischen Varianzen $u^2(x_i)$ gebildet. Diese können z. B. bestimmt werden

- für wiederholt gemessene Eingangsgrößen aus den entsprechenden Standardabweichungen $s(x_i)$ mit $u^2(x_i) = s^2(x_i)$
- für Größen, die für die Auswertung benötigt, aber nicht gemessen werden, durch Übernahme aus der Literatur oder Abschätzung aus Erfahrung
- für Einflußgrößen mit zugeordneter Verteilung durch Berechnung der Varianz gemäß dieser Verteilung (für eine Rechteckverteilung z. B. ein Drittel der Fehlergrenze).

Darüber hinaus ist zu prüfen, ob alle Eingangsgrößen unkorreliert sind. Wenn dies nicht der Fall ist, sind zusätzlich die entsprechenden Kovarianzen zu berechnen.

Die Zusammenfassung der Meßunsicherheiten für die einzelnen Eingangsgrößen erfolgt nach dem Fortpflanzungsgesetz für Meßunsicherheiten. Dazu ist für jede Meßgröße die entsprechende partielle Ableitung der Modellfunktion zu bilden. Für die Meßgrößen selbst sind die zugehörigen Schätzwerte x_i ($i = 1, \dots, m$) einzusetzen.

Die Standardunsicherheit $u(y)$ ergibt sich dann zu:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i,k=1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_k} \cdot u(x_i, x_k)} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{k=i+1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_k} \cdot u(x_i, x_k)} \quad (\text{B1})$$

Für unkorrelierte Eingangsgrößen gilt

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (\text{B2})$$

mit $u(y)$ – Meßunsicherheit für die Meßgröße Y

$u(x_i)$ – Meßunsicherheit für die Eingangsgröße X_i

$\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)$ – partielle Ableitung der Modellfunktion f nach der Eingangsgröße X_i , genommen an den Schätzwerten x_i

m – Anzahl der Eingangsgrößen.

Neben diesem beschriebenen Verfahren der Ermittlung der Meßunsicherheit $u(y)$, das auf der Bildung der jeweiligen partiellen Ableitungen der Modellfunktion beruht, ist eine zweite Methode anwendbar, die unter dem Begriff „numerische Berechnung“ in Abschnitt 6.3.2 der DIN 1319-3 beschrieben ist. Hierbei kann auf die explizite Bildung der Ableitungen der Modellfunktion verzichtet werden. Dieses Verfahren wird insbesondere dann empfohlen, wenn die Ableitungen schwer zu bilden sind oder wenn die Modellfunktion f nur als Rechnerprogramm vorliegt.

Hierfür werden zunächst die Differenzen

$$\Delta_i f = f(x_1, \dots, x_i + u(x_i)/2, \dots, x_m) - f(x_1, \dots, x_i - u(x_i)/2, \dots, x_m); \quad (i = 1, \dots, m) \quad (\text{B3})$$

berechnet, aus denen danach

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\Delta_i f)^2 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{k=i+1}^m (\Delta_i f)(\Delta_k f)r(x_i, x_k)} \quad (\text{B4})$$

ermittelt wird, wobei der zweite Summand in Gleichung (B4) mögliche Korrelationen der Eingangsgrößen berücksichtigt und mit

$$r(x_i, x_k) = \frac{u(x_i, x_k)}{u(x_i)u(x_k)} = \frac{s(x_i, x_k)}{s(x_i)s(x_k)}. \quad (\text{B5})$$

der zugehörige Korrelationskoeffizient bezeichnet ist.

Für unkorrelierte Eingangsgrößen gilt

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\Delta_i f)^2}. \quad (\text{B6})$$

Die vollständige Angabe des Meßergebnisses einer Messung umfaßt in jedem Fall das Meßergebnis y für die Meßgröße Y selbst und die Meßunsicherheit $u(y)$. Diese kann als Absolutwert in der Einheit der Meßgröße oder als Relativwert angegeben werden. Für praktische Anwendungen ist es üblich, nicht die Standardmeßunsicherheit $u(y)$ zu verwenden, sondern die erweiterte Unsicherheit $U(y) = k \cdot u(y)$ als dem Vielfachen der Standardmeßunsicherheit $u(y)$. Der Faktor k ist stets > 1 und heißt Erweiterungsfaktor. Er ist grundsätzlich anzugeben. Im allgemeinen wird $k = 2$ verwendet. Der Wert der Meßgröße selbst liegt dann im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Wertintervall.

Berechnungsbeispiel

Das nachfolgend aufgeführte Beispiel behandelt die Bestimmung der Düsenkennzahl $Q_{V,20, tr}$ durch eine Ein-Punkt-Prüfung mit Hilfe eines Normalgaszählers. Dabei wird versucht, beide beschriebenen Verfahren zu kombinieren, um möglichst viele praktische Informationen innerhalb dieses Beispiels abhandeln zu können.

Verwendet werden die Zahlenwerte aus dem Berechnungsbeispiel in Abschnitt 3.4 sowie die folgenden, in Anlehnung an Abschnitt 2.2 angenommenen Meßunsicherheiten:

Meßgröße	Meßwert x_i	Meßunsicherheit $u(x_i)$
Atmosphärendruck p_a	991,2 mbar	0,5 mbar
Eingangsdruck am Normal p_N	991,2 mbar	0,2 mbar
Eingangsdruck an der Düse p_D	989,8 mbar	0,2 mbar
Prüfraumtemperatur t_a	23,30 °C	0,2 K
Temperatur am Normal t_N	23,15 °C	0,1 K
Eingangstemperatur an der Düse t_D	23,45 °C	0,1 K
relative Feuchte der Prüfluft h	25 %	5 %
Volumenanzeige des Normals V_N	200 dm ³	0,16 % ¹
Meßabweichung des Normals f_N	0,10 %	in $u(V_N)$ enthalten
Meßzeit für das Volumen am Normal t	120,08 s	0,001 s

Die zu verwendende Bestimmungsgleichung für die Düsenkennzahl $Q_{V,20, tr}$ lautet (Gleichung (11) aus Abschnitt 3.2.1):

$$Q_{V,20, tr} = \frac{\rho_N}{\rho_D} \cdot \frac{1}{(1 + 0,169 \cdot x_v)} \cdot \sqrt{\frac{293,15}{T_D}} \cdot Q_N. \quad (11)$$

1 Im allgemeinen ist dies die **relative** Standardunsicherheit aus dem Prüfschein des verwendeten Normalzählers $u_{rel}(y) = U_{rel}(y)/k = U_{rel}(y)/2$.

Alle weiteren Berechnungsgleichungen für die darin enthaltenen Größen Dichte am Normalzähler ρ_N bzw. vor der Düse ρ_D , molarer Wasserdampfanteil x_v und Durchfluß am Normal Q_N sind ebenfalls in Abschnitt 3.2.1 zu finden.

Diese Gleichung wird zunächst nach dem ersten Verfahren auf der Basis der partiellen Ableitungen der Modellfunktion behandelt, wobei auch die abgeleiteten Eingangsgrößen ρ_N , ρ_D , x_v und Q_N wie direkt zugängliche Meßgrößen betrachtet werden, deren Meßunsicherheiten aber erst in einem weiteren Schritt jeweils separat ermittelt werden. Dies geschieht insbesondere aus Gründen der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit, da diese genannten Größen selbst nur mittelbar durch die Messung anderer Parameter (Druck, Temperatur, Feuchte, ...) bestimmt werden können, von denen sie teilweise in sehr komplizierter Weise abhängen. Außerdem wird für alle Meßgrößen mit den zugehörigen relativen Meßunsicherheiten gearbeitet, woraus folgt, daß auch die Gesamtstandardmeßunsicherheit als relative Meßunsicherheit $u_{\text{rel}}(y)$ ermittelt wird.

Die konkrete Ableitung der Gleichung (11) kann auf folgende Weise durchgeführt werden:

Gleichung (11) hat die allgemeine Form

$$Y = \alpha \cdot \prod_{i=1}^N X_i^{\beta_i} \quad (\text{B7})$$

deren Schätzwert y nach der Gleichung

$$y = \alpha \cdot \prod_{i=1}^N x_i^{\beta_i} \quad (\text{B8})$$

berechnet wird. Gemäß der in Abschnitt 5.1.6 des ISO-Guide [B2] dargestellten Verfahrensweise ergibt sich für die Meßunsicherheit

$$\begin{aligned}
 u^2(y) &= \sum_{i=1}^N \left(\alpha \cdot \beta_i \cdot X^{\beta_i-1} \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N X_j^{\beta_j} \right) \bigg|_{X_1, \dots, X_N} \cdot u^2(x_i) \\
 &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{\alpha \cdot \beta_i}{x_i} \cdot \prod_{j=1}^N x_j^{\beta_j} \right)^2 \cdot u^2(x_i) = y^2 \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{\beta_i}{x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) = y^2 \cdot \sum_{i=1}^N \beta_i^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(x_i) \quad (\text{B9})
 \end{aligned}$$

bzw.

$$u_{\text{rel}}^2(y) = \sum_{i=1}^N \beta_i^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(x_i). \quad (\text{B10})$$

Daraus ergibt sich für die relative Meßunsicherheit für $Q_{V,20,\text{trN}}$

$$u_{\text{rel}}^2(Q_{V,20,\text{tr}}) = u_{\text{rel}}^2(\rho_N) + u_{\text{rel}}^2(\rho_D) + \left(\frac{0,169 \cdot x_v}{1 + 0,169 \cdot x_v} \right)^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(x_v) + \frac{1}{4} \cdot u_{\text{rel}}^2(T_D) + u_{\text{rel}}^2(Q_N) \quad (\text{B11})$$

Die Einzelmeßunsicherheiten können jetzt entweder ebenfalls nach diesem Verfahren ermittelt werden, z. B. für relative Meßunsicherheit des Volumendurchflusses am Normal Q_N zu

$$u_{\text{rel}}^2(Q_N) = u_{\text{rel}}^2(V_N) + u_{\text{rel}}^2(t). \quad (\text{B12})$$

Für die übrigen abgeleiteten Größen empfiehlt es sich jedoch, das zweite beschriebene Verfahren (numerisches Verfahren) zu verwenden. Dies soll im folgenden für den molaren Wasserdampfanteils x_v gezeigt werden, für dessen Berechnung die Gleichungen (18) bis (21) aus dem Abschnitt 3.2.1 gelten:

$$x_v = h \cdot x_{\text{sv}}(t_a) \cdot 10^{-2} \quad (18)$$

mit

$$x_{\text{sv}}(t_a) = f(p_a, t_a) \cdot \frac{p_{\text{sv}}(t_a)}{p_a} \cdot 10^{-2} \quad (19)$$

$$f(p_a, t_a) = 1,00062 + 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot p_a + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot t_a^2 \quad (20)$$

$$p_{\text{sv}}(t_a) = \exp \left[1,2811805 \cdot 10^{-5} \cdot (273,15 + t_a)^2 - 1,9509874 \cdot 10^{-2} \cdot (273,15 + t_a) + 34,04926034 - 6,3536311 \cdot 10^3 \cdot (273,15 + t_a)^{-1} \right] \quad (21)$$

Die Bildung der partiellen Ableitungen für solche umfangreichen Gleichungen kann also umgangen werden, wenn man die hier als Eingangsgrößen benötigten Parameter für die relative Luftfeuchte h sowie für die Umgebungsbedingungen t_a und p_a in den Grenzen der Hälfte ihrer eigenen Meßunsicherheiten variiert und daraus die resultierenden Auswirkungen auf x_v bestimmt:

Tabelle B-1: Bestimmung der Meßunsicherheit von $u_{\text{rel}}(x_v)$

h in %	t_a in °C	p_a in mbar	x_v	Δf
25	23,3	991,2	0,007 246	
22,5	23,3	991,2	0,006 522	
27,5	23,3	991,2	0,007 971	0,001 449
25	23,2	991,2	0,007 203	
25	23,4	991,2	0,007 290	0,000 087
25	23,3	990,95	0,007 248	
25	23,3	991,45	0,007 245	- 0,000 003
			$u_{\text{rel}}(x_v)$	0,200 386

In ähnlicher Weise ist für die Dichte am Normalzähler und vor der Düse zu verfahren.

Tabelle B-2 zeigt alle wie beschrieben ermittelten Unsicherheiten für die in Gleichung (11) enthaltenen Eingangsgrößen.

Tabelle B-2: Eingangsdaten für die Größen aus Gleichung (11)

Eingangsgröße X_i	Schätzwert bzw. Meßergebnis x_i	rel. Meßunsicherheit $u(x_i)/ x_i $	Varianz $u^2(x_i)$
ρ_N	1,162 55 kg/m ³	$6,74 \cdot 10^{-4}$	$4,543 \cdot 10^{-7}$
ρ_D	1,159 73 kg/m ³	$6,74 \cdot 10^{-4}$	$4,543 \cdot 10^{-7}$
x_v	0,007 246	$2,004 \cdot 10^{-1}$	$4,016 \cdot 10^{-2}$
T_D	296,60 K	$3,37 \cdot 10^{-4}$	$1/3 \cdot 1,136 \cdot 10^{-7}$
Q_N	5,962 25 m ³ /h	$8,0004 \cdot 10^{-4}$	$6,401 \cdot 10^{-7}$

Setzt man wiederum für alle Eingangsgrößen voraus, daß sie nicht korreliert sind, ergibt sich die relative Gesamtstandardunsicherheit aus den Werten der Tabelle B-2 nach Gleichung (B11) zu

$$u_{\text{rel}}(y) = 1,272 \cdot 10^{-3} = 0,127 \text{ \%}.$$

Die erweiterte relative Standardunsicherheit beträgt

$$U_{\text{rel}}(y) = 0,254 \text{ \%}.$$

Als Erweiterungsfaktor wurde $k = 2$ verwendet.

Außer der Angabe dieses Erweiterungsfaktors kann auch darauf verwiesen werden, daß diese Meßunsicherheit gemäß dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (ISO, 1995) ermittelt wurde und daß der Wert der ermittelten Meßgröße im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Werteintervall liegt.

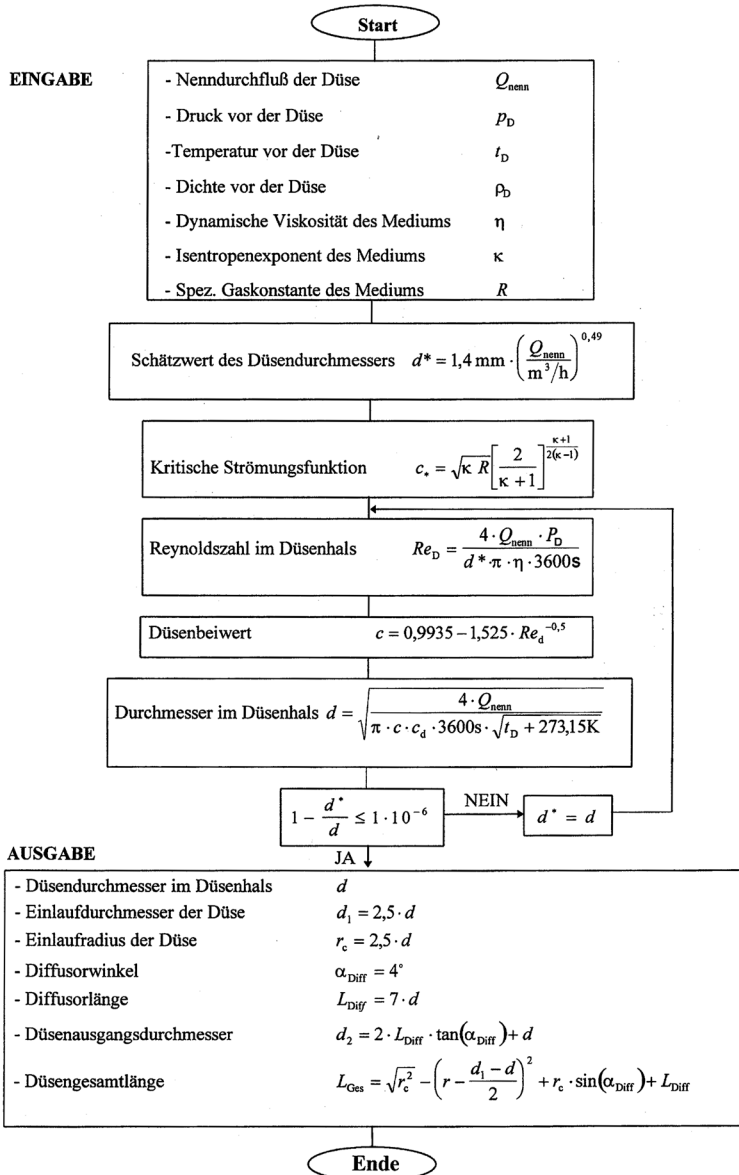
Zitierte Literatur

- [B1] Deutsche Norm DIN 1319-3: Grundlagen der Meßtechnik. Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße. Meßunsicherheit. Ausgabe Mai 1996. Beuth Verlag Berlin
- [B2] BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUAP/OIML: Guide to the expression of uncertainty in measurement. First edition. ISO, Genf 1993 bzw. Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Beuth Verlag Berlin, Köln 1995

Anhang C

Algorithmus zur Berechnung der Geometrie einer kritischen Düse

Anhang C



Anhang D

Beispiel für die Durchführung der Dichtheitsprüfung mit Unterdruck

Äußere Dichtheit

Bei der Prüfung auf äußere Dichtheit wird vor Beginn der Zählerprüfung der Prüfling, die Rohrleitung zwischen Prüfling und Düsennormal, das Düsennormal sowie die angeschlossenen Druckmeßgeräte auf Dichtheit gegenüber der Atmosphäre überprüft.

Der Prüfling befindet sich am Eingangsflansch des Düsennormals und ist an seinem Eingang mit einem Blindflansch verschlossen. Das Gebläse ist ausgeschaltet und alle Ventile sowie der Bypass sind geöffnet, d. h. in der Anlage herrscht überall der gleiche atmosphärische Druck. Bild D-1 zeigt schematisch an drei Düsensträngen diesen ersten Betriebszustand bei der Prüfung auf äußere Dichtheit.

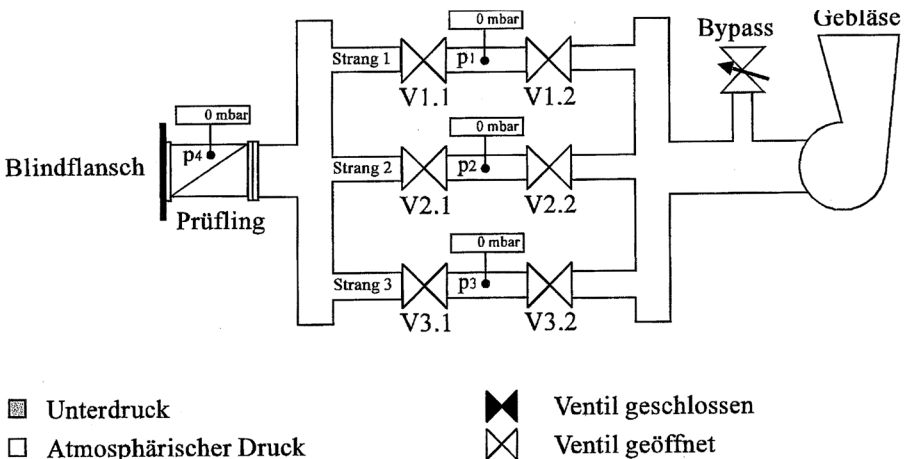
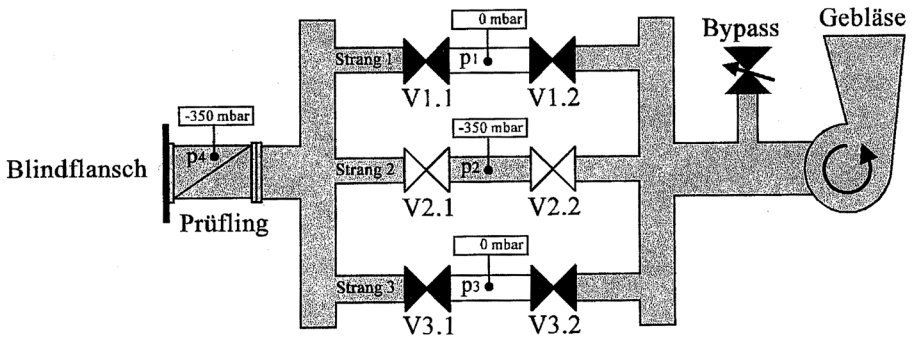


Bild D-1: Betriebszustand 1 bei der Prüfung auf äußere Dichtheit

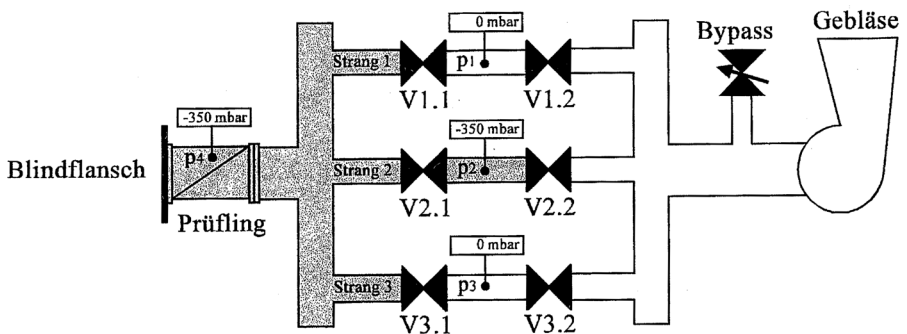
Anschließend werden alle Ventile bis auf die eines Stranges geschlossen (hier Strang 2 im Bild D-2) und das Gebläse gestartet. Nach Schließen des Bypasses baut sich im Prüfling, dem Eintrittssammler, dem geöffneten Düsenstrang und dem Austrittssammler ein Unterdruck auf (s. Bild D-2).



- | | |
|---|--|
|  Unterdruck |  Ventil geschlossen |
|  Atmosphärischer Druck |  Ventil geöffnet |

Bild D-2: Betriebszustand 2 bei der Prüfung auf äußere Dichtheit

Zeigen die Drucksensoren der geschlossenen Stränge (hier Strang 1 und Strang 3) ebenfalls einen Unterdruck an, so ist eines der Absperrventile undicht und die angeschlossene Steuerung meldet einen Fehler. Bleibt in diesen Strängen der Druck jedoch unverändert, werden alle Ventile geschlossen. Anschließend wird das Gebläse abgeschaltet und der Bypass geöffnet. Bild D-3 zeigt den Betriebszustand der Anlage nach Abschalten des Gebläses.



- | | |
|---|--|
|  Unterdruck |  Ventil geschlossen |
|  Atmosphärischer Druck |  Ventil geöffnet |

Bild D-3: Betriebszustand 3 bei der Prüfung auf äußere Dichtheit

Die Drucksensoren für p_1 und p_3 messen den atmosphärischen Druck. In Strang 2 bleibt weiterhin ein Unterdruck. Mit den Drucksensoren für p_4 und p_2 werden die eingeschlossenen Unterdrücke während der Testzeit $\Delta t_{\text{prüf}}$ überwacht. Hat sich der Druck p_4 am Prüfling während dieser Zeit nur um ein erlaubtes Δp_4 verändert, dann gilt die Anlage als dicht und der Blindflansch kann entfernt werden. Fällt der eingeschlossene Unterdruck p_4 um mehr als das zulässige Δp_4 , dann ist entweder die zuletzt geschlossene Sperrstrecke oder die Verbindung zwischen Prüfling und Düsennormal undicht.

Innere Dichtheit

Die Prüfung auf innere Dichtheit des Düsenprüfstandes soll ausschließen, daß sich durch Undichtheiten an geschlossenen Düsensträngen ein ungewollter Nebenfluß, parallel zum Hauptdurchfluß, einstellt.

Zu Beginn dieser Prüfung ist das Gebläse ausgeschaltet, der Prüfling angeschlossen und alle Düsenstränge sind abgeschaltet. Der Bypass ist geöffnet. Durch einen Steuerbefehl werden alle Eingangsventile der Düsenmeßstrecken V1.1, V2.1 und V3.1 kurzzeitig geöffnet und dann wieder geschlossen (Bild D-4).

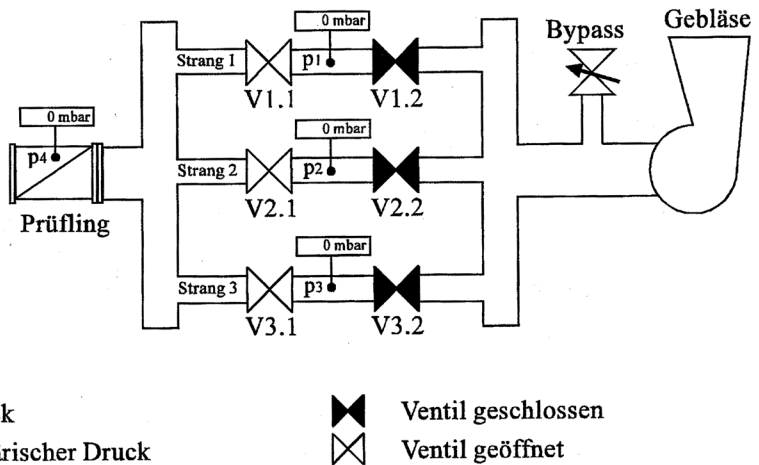
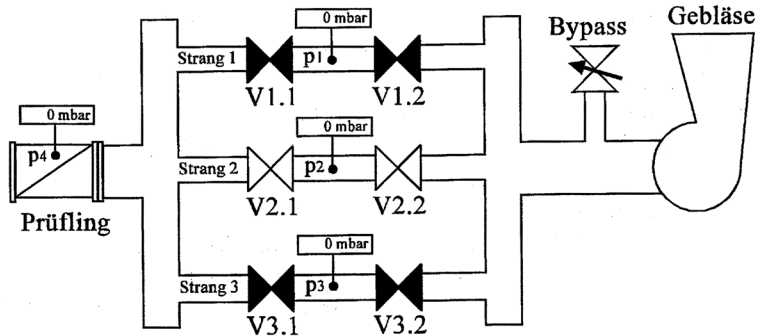


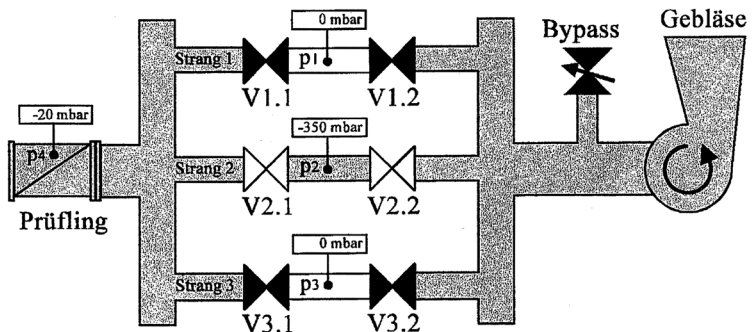
Bild D-4: Belüften der Sperrstrecken zwischen den Absperrventilen

Durch diesen Vorgang gelangt atmosphärischer Luftdruck in den Raum zwischen den zwei Absperrventilen. Anschließend werden die Düsenstrecken, die bei der Prüfung am ersten Prüfpunkt beteiligt sind, geöffnet und alle anderen bleiben geschlossen. Bild D-5 zeigt den Status der Anlage zu diesem Zeitpunkt.



- | | |
|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Unterdruck | <input checked="" type="checkbox"/> Ventil geschlossen |
| <input type="checkbox"/> Atmosphärischer Druck | <input type="checkbox"/> Ventil geöffnet |

Bild D-5: Status der Anlage nach Auswahl der beteiligten Meßstränge



- | | |
|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Unterdruck | <input checked="" type="checkbox"/> Ventil geschlossen |
| <input type="checkbox"/> Atmosphärischer Druck | <input type="checkbox"/> Ventil geöffnet |

Bild D-6: Zustand des Düsennormals bei eingestelltem Prüfpunkt

Danach werden das Gebläse gestartet und der Bypass geschlossen. Durch den Prüfling wie auch die geöffneten Stränge stellt sich ein konstanter Durchfluß ein. Dieser bewirkt am Prüfling, dem Ein- und Austrittsammler sowie den geöffneten Strängen einen Unterdruck. In Bild D-6 ist dieser Prüfzustand schematisch gezeigt.

Meldet einer der Drucksensoren an den unbeteiligten Meßstrecken (hier Strang 1 und Strang 3) einen Unterdruck, dann ist eines oder sind beide Ventile undicht und die Prüfung muß abgebrochen werden. Ist dies während der gesamten Prüfzeit bei dem eingestellten Belastungspunkt nicht der Fall, kann ein weiterer Prüfpunkt eingestellt werden. Hierzu wird zunächst der Bypass geöffnet, nachfolgend alle Ventile geschlossen und anschließend alle Eingangsventile V1.1, V2.1 und V3.1 geöffnet. Stellt sich in den Rohrstücken zwischen den Ventilen atmosphärischer Druck ein, sind alle ausgangsseitigen Ventile dicht und die Prüfung kann wie mit Bild D-4 beschrieben mit eingeschaltetem Gebläse fortgesetzt werden. Zeigt einer der Drucksensoren einen Unterdruck an, muß die Prüfung unterbrochen werden. Zur besseren Übersicht werden abschließend mögliche Leckageorte und deren Ermittlung tabellarisch aufgelistet.

Übersicht der möglichen Leckageorte und deren Ermittlung

Leckageort	Ermittlung der Leckage
Blindflansch am Prüflings- Eingang	Prüfung auf äußere Dichtheit Nach abgeschaltetem Gebläse fällt der Unterdruck am Prüfling oder dem Eingangssammler.
innerhalb des Prüflings	Prüfung auf äußere Dichtheit Nach abgeschaltetem Gebläse fällt der Unterdruck am Prüfling oder dem Eingangssammler.
Verbindung Prüfling – Eingangssammler	Prüfung auf äußere Dichtheit Nach abgeschaltetem Gebläse fällt der Unterdruck am Prüfling oder dem Eingangssammler.
Eingangssammler	Prüfung auf äußere Dichtheit Nach abgeschaltetem Gebläse fällt der Unterdruck am Prüfling oder dem Eingangssammler.
vorderes Absperrventil	Prüfung auf äußere Dichtheit <ol style="list-style-type: none"> 1. Handelt es sich um eine abgeschaltete Strecke (beide Ventile geschlossen), baut sich schon bei laufendem Gebläse in der Sperrstrecke zwischen den Absperrventilen ein Unterdruck auf. Dies setzt sich dann bei abgeschaltetem Gebläse weiter fort. 2. Handelt es sich um eine zunächst geöffnete Strecke, dann ist ein undichtes vorderes Ventil mit der Prüfung auf Äußere Dichtheit nicht erkennbar. Prüfung auf innere Dichtheit In der abgeschlossenen und zuvor belüfteten Sperrstrecke stellt sich ein Unterdruck ein.
Rohrstück zwischen den Absperrventilen	Unkritisch Solange sich ein kritisches Druckverhältnis einstellt, entsteht durch eine dortige Leckage keine Fehlmessung.

Leckageort	Ermittlung der Leckage
hinteres Absperrventil	<p>Prüfung auf äußere Dichtheit</p> <p>1. Handelt es sich um eine abgeschaltete Strecke (beide Ventile geschlossen), baut sich schon bei laufendem Gebläse in dem Rohrstück zwischen den Absperrventilen ein Unterdruck auf.</p> <p>2. Handelt es sich um eine zunächst geöffnete Strecke, reduziert sich der nach Abschalten des Gebläses der dort eingesperrte Unterdruck.</p> <p>Prüfung auf innere Dichtheit</p> <p>In dem abgeschlossenen und zuvor belüfteten Rohrstück zwischen den Ventilen stellt sich ein Unterdruck ein.</p> <p>Zwischen jedem Prüfpunkt</p> <p>Nach jedem Prüfpunkt werden bei laufendem Gebläse alle hinteren Ventile geschlossen und alle vorderen geöffnet, um die Rohrstücke zwischen den Ventilen zu belüften. Stellt sich bei diesem Vorgang zwischen den Ventilen ein Unterdruck ein, dann muß das hintere Ventil dieses Stranges undicht sein.</p>
Ausgangssammler	<p>Unkritisch</p> <p>Solange sich ein kritisches Druckverhältnis einstellt, entsteht durch eine Leckage dort keine Fehlmessung.</p>
Verbindung Ausgangssammler – Formstück	<p>Unkritisch</p> <p>Solange sich ein kritisches Druckverhältnis einstellt, entsteht durch eine Leckage dort keine Fehlmessung.</p>
Verbindung Formstück-Gebläse	<p>Unkritisch</p> <p>Solange sich ein kritisches Druckverhältnis einstellt, entsteht durch eine Leckage dort keine Fehlmessung.</p>

