

DIN EN ISO 9300



ICS 17.120.10

Entwurf

Einsprüche bis 2021-09-30
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN ISO 9300:2005-11

**Durchflussmessung von Gasen mit Venturidüsen bei kritischer Strömung
(ISO/DIS 9300:2021);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 9300:2021**

Measurement of gas flow by means of critical flow nozzles (ISO/DIS 9300:2021);
German and English version prEN ISO 9300:2021

Mesure de débit de gaz au moyen de Venturi-tuyères en régime critique (ISO/DIS 9300:2021);
Version allemande et anglaise prEN ISO 9300:2021

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2021-07-30 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an natg@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG), 10772 Berlin oder Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 251 Seiten

DIN-Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 9300:2021) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 30 „Measurement of fluid flow in closed conduits“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/SS F05 „Messinstrumente“ erarbeitet, dessen Sekretariat von CCMC gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 152-04-02 AA „Durchfluss und Menge“ im DIN-Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 5167-1:2003	siehe	DIN EN ISO 5167-1:2004-01
ISO 5167-2:2003	siehe	DIN EN ISO 5167-2:2004-01
ISO 12213-1:2006	siehe	DIN EN ISO 12213-1:2010-01
ISO 12213-2:2006	siehe	DIN EN ISO 12213-2: 2010-01
ISO 12213-3:2006	siehe	DIN EN ISO 12213-3: 2010-01
ISO 20765-1:2005	siehe	DIN EN ISO 20765-1:2018-12
ISO 20765-2:2015	siehe	DIN EN ISO 20765-2:2018-12

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 9300:2005-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Dokument vollständig überarbeitet und an den aktuellen Stand der Technik angepasst.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 5167-1:2004-01, *Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt — Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Anforderungen (ISO 5167-1:2003); Deutsche Fassung EN ISO 5167-1:2003*

DIN EN ISO 5167-2:2004-01, *Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt — Teil 2: Blenden (ISO 5167-2:2003); Deutsche Fassung EN ISO 5167-2:2003*

DIN EN ISO 12213-1:2010-01, *Erdgas — Berechnung von Realgasfaktoren — Teil 1: Einführung und Leitfaden (ISO 12213-1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 12213-1:2009*

DIN EN ISO 12213-2:2010-01, *Erdgas — Berechnung von Realgasfaktoren — Teil 2: Berechnungen basierend auf einer molaren Gasanalyse als Eingangsgröße (ISO 12213-2:2006); Deutsche Fassung EN ISO 12213-2:2009*

DIN EN ISO 12213-3:2010-01, *Erdgas — Berechnung von Realgasfaktoren — Teil 3: Berechnungen basierend auf physikalischen Stoffeigenschaften als Eingangsgrößen (ISO 12213-3:2006); Deutsche Fassung EN ISO 12213-3:2009*

DIN EN ISO 20765-1:2018-12, *Erdgas — Berechnung thermodynamischer Eigenschaften — Teil 1: Eigenschaften der Gasphase für Zwecke des Transports und der Verteilung (ISO 20765-1:2005); Deutsche Fassung EN ISO 20765-1:2018*

DIN EN ISO 20765-2:2018-12, *Erdgas — Berechnung thermodynamischer Eigenschaften — Teil 2: Einphaseneigenschaften (gasförmig, flüssig und dickflüssig) für den erweiterten Anwendungsbereich (ISO 20765-2:2015); Deutsche Fassung EN ISO 20765-2:2018*

— Leerseite —

Titel de: Durchflussmessung von Gasen mit Venturidüsen bei kritischer Strömung (ISO/DIS 9300:2021)

Titel en: Measurement of gas flow by means of critical flow nozzles (ISO/DIS 9300:2021)

Titel fr: Mesure de débit de gaz au moyen de Venturi-tuyères en régime critique (ISO/DIS 9300:2021)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort.....	5
Vorwort	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Symbole und Abkürzungen.....	12
5 Grundgleichungen	15
5.1 Gasverhalten.....	15
5.1.1 Isentroper Prozess	15
5.1.2 Zustandsgleichung.....	16
5.2 Isentrope Strömung eines idealen Gases.....	16
5.2.1 Strömungsquerschnitt.....	16
5.2.2 Statischer Druck.....	16
5.2.3 Statische Temperatur.....	16
5.3 Theoretische Variablen am kritischen Punkt.....	16
5.3.1 Allgemeines.....	16
5.3.2 Kritischer Druck.....	16
5.3.3 Kritische Temperatur	16
5.3.4 Kritische Dichte	17
5.3.5 Kritische Geschwindigkeit.....	17
5.4 Theoretischer Massendurchfluss	17
5.4.1 Allgemeines.....	17
5.4.2 Theoretischer Massendurchfluss eines idealen Gases	17
5.4.3 Theoretischer Massendurchfluss eines realen Gases	17
5.5 Massendurchfluss	17
6 Allgemeine Anforderungen	18
7 Anwendungen, für die das Messverfahren geeignet ist.....	18
8 CFN	19
8.1 Allgemeine Anforderungen an beide Standardausführungen	19
8.1.1 Allgemeines.....	19
8.1.2 Werkstoffe	19
8.1.3 Engstelle und Halsteil.....	19
8.1.4 Diffusor	20
8.2 Anforderungen an die Standardausführungen.....	20
8.2.1 Standard-CFNs.....	20
8.2.2 CFN mit Toroidhals.....	21
8.2.3 CFN mit Zylinderhals	22
9 Einbauanforderungen.....	24
9.1 Allgemeine Anforderungen an beide Standardkonfigurationen	24
9.1.1 Standardkonfigurationen	24
9.1.2 Druckentnahmestelle im Einlaufrohr	24
9.1.3 Druckentnahmestelle am Auslaufrohr	25
9.1.4 Messung der Temperatur	25

9.1.5	Messung der Dichte.....	26
9.1.6	Entleerungsbohrung.....	26
9.1.7	Bedingungen im Nachlaufrohr	26
9.2	Rohrkonfiguration	26
9.2.1	Allgemeines	26
9.2.2	Einlaufrohr.....	26
9.2.3	Messung des Drucks.....	27
9.2.4	Messung der Temperatur.....	28
9.3	Kammerkonfiguration.....	28
9.3.1	Allgemeines	28
9.3.2	Einlaufkammer.....	28
9.3.3	Messung des Drucks.....	28
9.3.4	Messung der Temperatur.....	28
9.3.5	Ausgangsdruckverhältnis.....	28
10	Berechnungen.....	29
10.1	Allgemeines	29
10.2	Berechnung des Massendurchflusses, q_m	29
10.3	Berechnung des Durchflusskoeffizienten, C_d	29
10.4	Berechnung der kritischen Durchflussfunktion, C^* oder C^*_D	30
10.5	Umrechnung des gemessenen Drucks in Ruhedruck.....	31
10.6	Umrechnung der gemessenen Temperatur in Ruhetemperatur.....	31
10.7	Berechnung der Viskosität.....	31
11	Abschätzung des kritischen Ausgangsdruckverhältnisses.....	31
11.1	Für herkömmlichen Diffusor bei Reynolds-Zahlen höher als 2×10^5	31
11.2	Für alle Diffusoren bei niedrigen Reynolds-Zahlen	32
11.3	Für CFNs ohne Diffusor oder mit sehr kurzem Diffusor	33
12	Unsicherheiten bei der Durchflussmessung	33
12.1	Allgemeines	33
12.2	Praktische Berechnung der Messunsicherheit.....	34
12.3	Korrelierte Unsicherheitskomponenten	35
Anhang A (informativ) Werte der Durchflusskoeffizienten		37
Anhang B (informativ) Kritische Durchflussfunktion		39
B.1	Allgemeines	39
B.2	Kritische Durchflussfunktion eines idealen Gases.....	39
B.3	Kritische Durchflussfunktion eines realen Gases	40
B.4	Kritische Durchflussfunktion zur Verwendung bei Durchflusskalibrierung der CFN.....	40
B.4.1	Allgemeines	40
B.4.2	Verwendung im gleichen Gas bei gleichen Ruhebedingungen.....	40
B.4.3	Verwendung im gleichen Gas im gleichen Bereich der Ruhebedingungen.....	41
B.4.4	Bei Notwendig von genauen Werten	41
B.5	Gase mit signifikantem Schwingungsrelaxationseffekt.....	41
Anhang C (normativ) Werte der kritischen Durchflussfunktion — Reingase und Luft.....		42
C.1	Allgemeines	42
C.2	Stickstoff.....	43
C.3	Argon	45
C.4	Trockene Luft mit Kohlenstoffdioxid (CIPM 2007-Zusammensetzung + CO ₂ /0,04 %).....	47
C.5	Trockene Luft ohne Kohlenstoffdioxid (CIPM 2007-Zusammensetzung ohne CO ₂).....	49
C.6	Luftfeuchtekorrektur für Luft mit einer typischen Zusammensetzung.....	51
C.7	Methan.....	52
C.8	Kohlenstoffdioxid	56
C.9	Sauerstoff.....	59

C.10	Dampf (Einphasengas).....	62	
Anhang D (informativ) Berechnung des kritischen Massenstroms für Düsen bei kritischer Strömung mit einem großen Durchmesser Verhältnis Düsenhals/Einlaufrohr, $\beta > 0,25$			
D.1	Allgemeines.....	65	
D.2	Korrektionsfaktoren	65	
Anhang E (informativ) Durchmesserkorrekturmethode			69
E.1	Allgemeines.....	69	
E.2	Durchführung.....	69	
E.2.1	Visuelles Verfahren.....	70	
E.2.2	Grobes Verfahren.....	70	
E.2.3	Feines Verfahren.....	71	
Anhang F (informativ) Anpassung der Durchflusskoeffizienten-Kurve an einen Datensatz			74
F.1	Allgemeines.....	74	
F.2	Anpassungsverfahren	75	
Anhang G (informativ) Durchflusskoeffizient.....			82
G.1	Allgemeines.....	82	
G.2	Strömungsfeldverteilung entlang eines Durchmessers am kritischen Punkt.....	82	
G.3	Abhängigkeit des Durchflusskoeffizienten von der Reynolds-Zahl	83	
G.4	Grenzschichtenübergang.....	84	
G.5	Kurven der Durchflusskoeffizienten	85	
G.6	Ermitteln der Kurven der Durchflusskoeffizienten.....	86	
Anhang H (informativ) Kritisches Ausgangsdruckverhältnis.....			87
H.1	Allgemeines.....	87	
H.2	Theoretisches kritisches Ausgangsdruckverhältnis	88	
H.3	Beispiele für die typischen Drosselungsmuster mit dem Phänomen der vorzeitigen Entdrosselung (PUP)	89	
H.4	Drosselungsprüfung	92	
H.4.1	Gegen eine Referenz-CFN	92	
H.4.2	Gegen ein Referenz-Durchflussmessgerät.....	93	
Anhang I (informativ) Werte der Viskosität — Reingas und Luft.....			94
I.1	Allgemeines.....	94	
I.2	Stickstoff.....	96	
I.3	Argon	96	
I.4	Trockene Luft	98	
I.5	Methan.....	99	
I.5	Kohlenstoffdioxid	104	
I.6	Sauerstoff.....	107	
I.7	Dampf (Einphasengas).....	108	
Anhang J (informativ) Begründung.....			110
J.1	Allgemeines.....	110	
J.2	Ergänzungen zum Hauptteil	110	
Literaturhinweise.....			116

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 9300:2021) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 30 „Measurement of fluid flow in closed conduits“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/SS F05 „Messinstrumente“ erarbeitet, dessen Sekretariat von CCMC gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN ISO 9300:2005 ersetzen.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 9300:2021 wurde von CEN als prEN ISO 9300:2021 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Liste dieser Institute ist auf den Internetseiten von CEN abrufbar.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

ISO 9300 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 30, *Measurement of fluid flow in closed conduits*, Unterkomitee SC 2, *Pressure differential devices*, erarbeitet.

Diese dritte Ausgabe ersetzt die zweite Ausgabe (ISO 9300:2005), die technisch überarbeitet wurde.

Die in dieser Norm enthaltenen Informationen wurden aus vielen veröffentlichten Dokumenten und basierend auf der Erfahrung der Mitglieder des Technischen Komitees und anderer sachkundiger Ingenieure zusammengetragen. Diese Norm vereint verfügbare technische Informationen und bewährte Praktiken und soll ein praktischer Leitfaden für die ordnungsgemäße Verwendung von Düsen bei kritischer Strömung sein.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt die geometrische Gestalt und die Betriebsweise (Einbau in ein System und Betriebsbedingungen) von Düsen bei kritischer Strömung (CFNs, en: critical flow nozzles) fest, die den Massendurchfluss eines durch ein System strömenden Gases bestimmen, ohne die CFN grundsätzlich zu kalibrieren. Sie enthält außerdem die notwendigen Angaben für die Berechnung des Durchflusses und der zugehörigen Unsicherheit.

Muss der Durchfluss CFN kalibriert werden, müssen alle Anschlüsse, Betriebsbedingungen und Berechnungen den Vorgaben der Kalibriereinrichtung entsprechen, was in dieser Internationalen Norm nicht abgedeckt wird. Für einige Bedingungen, wie z. B. kleine CFNs oder Gas mit signifikantem Schwingungsrelaxationseffekt usw., wird die Durchflusskalibrierung empfohlen.

Diese Internationale Norm gilt für Düsen, in denen das Gas im kleinsten Strömungsquerschnitt auf die kritische Strömungsgeschwindigkeit beschleunigt wird und eine gleichbleibende Strömung nur für einphasiges Gas vorliegt. Bei Erreichen der kritischen Geschwindigkeit in der Düse hat der Massendurchfluss des durch die Düse strömenden Gases unter den auf der Einlaufseite vorhandenen Bedingungen sein Maximum, wobei die CFN nur innerhalb festgelegter Grenzen eingesetzt werden kann, z. B. das Verhältnis von Halsteil der CFN zum Durchmesser des Einlaufrohrs und Reynolds-Zahl. Diese Internationale Norm behandelt CFNs mit Toroid- und Zylinderhals, die in ausreichend häufigen Versuchen direkt kalibriert wurden, wodurch die sich draus ergebenden Koeffizienten mit vorhersagbaren Grenzwerten für die Unsicherheit angewendet werden können.

Sie enthält Angaben für Fälle, in denen die Rohrleitung vor der CFN einen kreisrunden Querschnitt aufweist, oder in denen ein großes Volumen (eine Kammer) vor der CFN oder vor einer Reihe von CFNs vorhanden ist. Die Raumkonfiguration bietet die Möglichkeit, CFNs in Parallelschaltung einzubauen, um damit große Durchflüsse und/oder veränderliche Volumendurchflüsse zu erzielen.

Zu Informationszwecken wird die Durchmesserkorrekturmethode (DCM, en: diameter correction method) beschrieben, die das Ergebnis einer Durchflusskalibrierung bei einer einzelnen Reynolds-Zahl nutzt, um die Kurve der Durchflusskoeffizienten an eine Referenzkurve anzupassen, indem der Düsenhalsdurchmesser verändert wird, ohne das Berechnungsergebnis des Durchflusses zu beeinflussen. Die DCM ersetzt die Rolle des Halsdurchmessers durch das Kalibrierergebnis; daher ist es nicht notwendig, den Halsdurchmesser bei Anwendung der DCM genau zu messen.

Die CFNs eignen sich besonders als Transferstandards, Referenz-Durchflussmesser für Kalibrier- und Prüfzwecke sowie für präzise Durchflussregelungsanwendungen. Unter der Voraussetzung, dass die Bedingungen im Einlaufrohr stabil sind, erzeugt eine CFN sofort eine stabile Gasströmung mit bekanntem Durchfluss, ohne dass irgendeine Einstellung vorgenommen werden muss, außer einer ausreichenden Absenkung des Drucks auf der Auslaufseite. Den CFNs sollte eine genaue Angabe der Unsicherheit für den gemessenen Durchfluss beigelegt sein.

2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe. In Zusammenhang mit Druck und Temperatur werden in dieser Internationalen Norm nur der absolute Druck bzw. die absolute Temperatur verwendet.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

3.1 Druck

3.1.1

statischer Druck

Druck des Gasstroms

Anmerkung zum Begriff: Der statische Druck kann durch Wand-Druckentnahmestellen gemessen werden.

3.1.2

Ruhedruck

Druck, der in einem Gasstrom vorhanden sein würde, wenn die Geschwindigkeit isentrop auf null verzögert wird

3.1.3

Wand-Druckentnahmestelle

in die Wand einer Rohrleitung gebohrtes Loch, durch das der statische Druck des Gasstroms in der Leitung gemessen wird

3.2 Temperatur

3.2.1

statische Temperatur

Temperatur des Gasstroms

Anmerkung zum Begriff: Die statische Temperatur kann nicht durch einen in der Rohrleitung befestigten Temperaturfühler gemessen werden (siehe J.3.2.1).

3.2.2

Ruhetemperatur

Temperatur, die in einem Gasstrom vorliegen würde, wenn die Geschwindigkeit isentrop auf null verzögert wird

3.2.3

Rückgewinnungstemperatur (Wandtemperatur, gemessene Temperatur)

Temperatur des Gases, das die Rohrwand berührt

Anmerkung zum Begriff: Der an einer Rohrleitung befestigte Temperaturfühler misst die Rückgewinnungstemperatur.

3.3 Düse

3.3.1

Engstelle

Teil der Düse vor dem Halsteil zur Beschleunigung des Durchflusses und zum Erreichen des geplanten Strömungsfelds am kritischen Punkt

3.3.2

Halsteil

Teil der Düse mit dem geringsten Querschnitt

Anmerkung zum Begriff: Diese Internationale Norm behandelt Düsen mit Toroid- und Zylinderhals.

3.3.3

Diffusor

auseinanderlaufender Teil der Düse hinter dem Halsteil zur Druckerholung

3.3.4

herkömmlicher Diffusor

Kegelstumpfdiffusor, aus einem Stück gefertigt

3.3.5

Düse

Vorrichtung, die in ein System eingesetzt wird und zur Messung des Durchflusses durch das System vorgesehen ist und aus Engstelle und Halsteil bzw. Engstelle, Halsteil und Diffusor besteht

3.3.6

Düse bei kritischer Strömung

CFN, en: critical flow nozzle

gedrosselte Düse

Düse, in der der kritische Durchfluss erreicht wird

3.3.7

normale Präzisionsdüse

NPN, en: normal precision nozzle

Düse, die auf einer Drehmaschine bearbeitet wurde, mit polierter Oberfläche, um die gewünschte Rauigkeit zu erzielen

3.3.8

Hochpräzisionsdüse

HPN, en: high precision nozzle

Düse, die auf einer Drehmaschine bearbeitet wurde, wodurch eine Hochglanzpolitur ohne Polieren der Oberfläche erreicht werden kann, so dass sie genau die Form hat, die für sie entworfen wurde

3.4 Strömung

3.4.1

isentropische Strömung

theoretische Strömung, bei welcher der thermodynamische Prozess adiabat und reversibel ist (siehe J.3.4.1)

3.4.2

kritische Strömung

Strömung durch eine Düse, die den maximalen Durchfluss der Düse für einen gegebenen Satz von Einlaufbedingungen erreicht hat

3.4.3

Drosseln

Erreichen der kritischen Strömung in einer Düse

3.4.4

kritischer Punkt

Punkt in der CFN, an dem die Strömung die kritische Geschwindigkeit erreicht

3.4.5

kritischer Druck

p^*

statischer Druck am kritischen Punkt

3.4.6

kritischer Druck eines idealen Gases

p_p^*
theoretischer statischer Druck am kritischen Punkt unter der Annahme einer isentropen Strömung eines idealen Gases

3.4.7

kritische Temperatur

T^*
statische Temperatur am kritischen Punkt

3.4.8

kritische Temperatur eines idealen Gases

T_p^*
theoretische statische Temperatur am kritischen Punkt unter der Annahme einer isentropen Strömung eines idealen Gases

3.4.9

kritische Dichte

ρ^*
Dichte am kritischen Punkt

3.4.10

kritische Dichte eines idealen Gases

ρ_p^*
theoretische Dichte am kritischen Punkt unter der Annahme einer isentropen Strömung eines idealen Gases

3.4.11

kritische Geschwindigkeit

c^*
Strömungsgeschwindigkeit am kritischen Punkt

3.4.12

kritische Geschwindigkeit eines idealen Gases

c_p^*
theoretische Strömungsgeschwindigkeit am kritischen Punkt unter der Annahme einer isentropen Strömung eines idealen Gases

3.5 Durchfluss

3.5.1

Massendurchfluss

q_m
durch die CFN durchgeflossene Masse eines Gases, dividiert durch die Zeit

Anmerkung zum Begriff: In dieser Internationalen Norm bezieht sich die Benennung „Massendurchfluss“ ohne irgendein Adjektiv immer auf den wahren Massendurchfluss durch eine CFN.

3.5.2

theoretischer Massendurchfluss eines idealen Gases

q_{thP}
theoretischer Massendurchfluss durch die CFN unter der Annahme einer eindimensionalen isentropen Strömung eines idealen Gases

3.5.3

theoretischer Massendurchfluss eines realen Gases

q_{thR}

theoretischer Massendurchfluss durch die CFN unter der Annahme einer eindimensionalen isentropen Strömung eines realen Gases

3.5.4

Volumendurchfluss

q_v

Volumen des Gases, das durch die Leitung, in der die CFN installiert ist, je Zeiteinheit an einer bestimmten Stelle strömt

Anmerkung zum Begriff: Der Volumendurchfluss an der bestimmten Stelle, an der die Dichte ρ vorhanden ist, ergibt sich aus:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho}$$

3.5.5

Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{4 q_m}{\pi d \mu_0}$$

dimensionsloser Parameter, berechnet aus dem Halsdurchmesser, dem Massendurchfluss und der dynamischen Viskosität des Gases im Ruhezustand im Einlaufrohr der CFN

3.5.6

Durchflusskoeffizient

$$C_d = \frac{q_m}{q_{thR}}$$

Verhältnis von Massendurchfluss zum theoretischen Durchfluss eines realen Gases bei gleichen Bedingungen im Ruhezustand im Einlaufrohr

3.5.7

kritisches Druckverhältnis

Verhältnis von kritischem Druck eines idealen Gases zum Ruhedruck im Einlaufrohr

3.5.8

Ausgangsdruckverhältnis

Verhältnis von statischem Druck am Diffusorausgang zum Ruhedruck im Einlaufrohr

3.5.9

Mach-Zahl einer Leitung

M_a

Verhältnis der mittleren axialen Strömungsgeschwindigkeit über den Querschnitt der Einlaufleitung zur Schallgeschwindigkeit an der gleichen Stelle

Anmerkung zum Begriff: M_a braucht kein genauer Wert zu sein und darf wie folgt angenähert werden:

$$M_a = \frac{q_m}{\frac{\pi D^2}{4} \rho_0} \frac{1}{\sqrt{\gamma \frac{R}{M} T_0}}$$

3.5.10

Messunsicherheit

Parameter für die Messergebnisse, der den Streubereich der Messwerte charakterisiert, der der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden könnte

3.6 Gas

3.6.1

ideales Gas

theoretisches Gas, dessen Isentropenexponent der Wärmekapazität entspricht, die in jedem Zustand des Gases konstant ist, und bei dem auch der Realgasfaktor immer gleich eins ist

3.6.2

Realgas

tatsächliches Gas, dessen Isentropenexponent und Realgasfaktor von dessen Druck und Temperatur abhängig sind

3.6.3

Realgasfaktor

Z

Korrekturfaktor für die Abweichung der Realgaskonstanten von der universellen Gaskonstanten

3.6.4

kritische Durchflussfunktion

C^*

dimensionslose Funktion, die die thermodynamischen Eigenschaften des Gases am Halsteil der CFN mit seinem Ruhezustand im Einlaufrohr in Beziehung setzt, wobei eine eindimensionale isentrope Strömung angenommen wird

3.6.5

kritische Durchflussfunktion für die Durchflussgleichung mit Dichte

$$C_D^* = C^* \sqrt{Z_0}$$

alternative kritische Durchflussfunktion zur Verwendung in der Gleichung für den Massendurchfluss mit Dichte

3.6.6

Isentropenexponent

κ

Verhältnis der relativen Druckschwankungen zur entsprechenden relativen Schwankung der Dichte während des isentropen Prozesses

4 Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Dimension	SI-Einheit
a, b, c, d, e, f, n	Koeffizienten für Gleichung (17)	dimensionslos	—
A_2	Querschnittsfläche des Düsenausgangs	L^2	m^2
A_{nt}	Querschnittsfläche am kritischen Punkt bei Betriebstemperatur der CFN	L^2	m^2
c	lokale Schallgeschwindigkeit	LT^{-1}	$m \cdot s^{-1}$
c^*	lokale Schallgeschwindigkeit am kritischen Punkt	LT^{-1}	$m \cdot s^{-1}$
c_p^*	lokale Schallgeschwindigkeit am kritischen Punkt eines idealen Gases	LT^{-1}	$m \cdot s^{-1}$
C_{c^*}	Parameter für die Gleichung von C^*	dimensionslos	—
C_μ	Parameter für die Gleichung von μ	dimensionslos	—
C_d	Durchflusskoeffizient	dimensionslos	—

Symbol	Bedeutung	Dimension	SI-Einheit
C_d^{target}	Sollwert des Durchflusskoeffizienten, der durch Anwendung der DCM erhalten wird	dimensionslos	—
C_d^{ISO}	Durchflusskoeffizient, der mit Gleichung (17) berechnet wird	dimensionslos	—
C^*	kritische Durchflussfunktion	dimensionslos	—
C_D^*	kritische Durchflussfunktion für die Durchflussgleichung mit Dichte	dimensionslos	—
C_p^*	kritische Durchflussfunktion eines idealen Gases	dimensionslos	—
C^{*DA}	kritische Durchflussfunktion von trockener Luft	dimensionslos	—
C^{*HA}	kritische Durchflussfunktion von feuchter Luft	dimensionslos	—
C_{ij}	Koeffizient zur Berechnung von C^*	b	b
c_v	Kovarianz	dimensionslos	—
D	Durchmesser der Einlaufleitung	L	m
d_{DCM}	Halsdurchmesser, korrigiert mit der DCM	L	m
d_{nt}	Halsdurchmesser bei Betriebstemperatur der CFN	L	m
d_{nt0}	gemessener Halsdurchmesser (bei Temperatur T_{nt0})	L	m
d_{ORI}	Halsdurchmesser zur Kalibrierung für die DCM	L	m
d_p	Durchmesser der Wand-Druckentnahmestelle in der Leitung	L	m
H_R	relative Luftfeuchte	%	—
k	Erweiterungsfaktor	dimensionslos	—
l	Diffusorlänge	L	m
l_1	Abstand zwischen dem Etoile-Gleichrichterausgang und der Eintrittsebene der Düse	L	m
l_2	Länge des Etoile-Gleichrichters	L	m
M	molare Masse	M	kg mol ⁻¹
M_a	lokale Mach-Zahl an der Druckentnahmestelle im Einlaufrohr	dimensionslos	—
M_{a2}	lokale Mach-Zahl am CFN-Ausgang unter der Annahme einer vollkommen subsonischen Strömung im Diffusor	dimensionslos	—
p	Gasdruck	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa
p_0	Ruhedruck des Gases im CFN-Einlauf	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa
p_1	statischer Druck des Gases, gemessen durch die Wand-Druckentnahmestelle in der Einlaufleitung	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa
p_2	statischer Druck des Gases am Diffusorausgang	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa
p_{2i}	theoretischer statischer Druck des Gases am Diffusorausgang, wenn die Düse gedrosselt ist, aber die Strömung im Diffusor vollkommen subsonisch ist	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa
p_{den}	statischer Druck im Gas am Dichtemessgerät	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa
P_r	Prandtl-Zahl	dimensionslos	—
p^*	statischer Druck am kritischen Punkt	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa
p_p^*	theoretischer statischer Druck am kritischen Punkt eines idealen Gases	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa
q_m	Massendurchfluss (wahrer Massendurchfluss)	MT ⁻¹	kg·s ⁻¹

Symbol	Bedeutung	Dimension	SI-Einheit
q_{thP}	theoretischer Massendurchfluss eines idealen Gases	MT^{-1}	$kg \cdot s^{-1}$
q_{thR}	theoretischer Massendurchfluss eines realen Gases	MT^{-1}	$kg \cdot s^{-1}$
q_v	Volumendurchfluss	MT^{-1}	$kg \cdot s^{-1}$
R	universelle Gaskonstante ($8,3145 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)	$M L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$	$J \text{ mol}^{-1} K^{-1}$
R_a	arithmetischer Mittelwert der Rauigkeit	L	m
R_e	Reynolds-Zahl	dimensionslos	—
R_e^{ORI}	Reynolds-Zahl zur Kalibrierung für die DCM	dimensionslos	—
R_f	Rückgewinnungsfaktor	dimensionslos	—
r_c	Radius der Engstelle in der Einlaufleitung	L	m
r_{CBP}	kritisches Ausgangsdruckverhältnis	dimensionslos	—
r_{nt}	Radius in der Nähe des Halsteileinlaufs einer CFN mit Zylinderhals	L	m
T	Temperatur des Gases	Θ	K
T_0	Ruhetemperatur des Gases am CFN-Einlauf	Θ	K
T_1	gemessene Temperatur des Gases am CFN-Einlauf	Θ	K
T_{den}	statische Temperatur am Dichtemessgerät	Θ	K
T_m	gemessene Temperatur	Θ	K
T_{nt0}	Temperatur bei Messung des Halsdurchmessers	Θ	K
T^*	statische Temperatur am kritischen Punkt	Θ	K
T_p^*	theoretische statische Temperatur am kritischen Punkt eines idealen Gases	Θ	K
T_{c^*}	Parameter für die Gleichung von C^*	Θ	K
T_μ	Parameter für die Gleichung von μ	Θ	K
u	Standardunsicherheit ($k = 1$)	b	—
u_c	kombinierte Standardunsicherheit ($k = 1$)	b	—
U	erweiterte Unsicherheit (mit festgelegtem Erweiterungsfaktor, k)	b	U
V_{ij}	Koeffizient zur Berechnung der Viskosität	b	U
U	erweiterte Unsicherheit (mit festgelegtem Erweiterungsfaktor, k)	b	U
x_i	Stoffmengenanteil des i -ten Bestandteils	dimensionslos	—
Z	Realgasfaktor	dimensionslos	—
Z_0	Realgasfaktor bei Ruhezustand in der Einlaufleitung	dimensionslos	—
Z_{den}	Realgasfaktor am Dichtemessgerät	dimensionslos	—
α	Längenausdehnungskoeffizient des Düsenwerkstoffs	Θ^{-1}	K^{-1}
β	Verhältnis von Halsdurchmesser zu Leitungsdurchmesser (d_{nt}/D)	dimensionslos	—
δ	absolute Messunsicherheit	a	a
γ	Verhältnis der Wärmekapazitäten	dimensionslos	—
κ	Isentropenexponent	dimensionslos	—

Symbol	Bedeutung	Dimension	SI-Einheit
μ_0	dynamische Viskosität des Gases im Ruhezustand an der Einlaufleitung	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa·s
μ	dynamische Viskosität des Gases	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa·s
θ	Winkel zwischen Kegelstumpfdiffusor-Wand und Düsen-Symmetrieachse	dimensionslos	rad
ρ	Dichte des Gases	ML^{-3}	kg
ρ_0	Dichte des Gases im Ruhezustand am Einlauf der Düse	ML^{-3}	kg·m ⁻³
ρ_{den}	Dichte des Gases, gemessen mit einem Dichtemessgerät	ML^{-3}	kg·m ⁻³
ρ^*	theoretische Dichte des Gases am kritischen Punkt	ML^{-3}	kg·m ⁻³
ρ_p^*	theoretische Dichte des Gases am kritischen Punkt eines idealen Gases	ML^{-3}	kg·m ⁻³
M = Masse; L = Länge; T = Zeit; Θ = Temperatur			
^a Die Dimension dieses Parameters ist die der Größe, auf die er sich bezieht. ^b Abhängig von jedem Ausdruck in der Gleichung.			

Abkürzung	Bedeutung
AOS	Symmetrieachse (en: axis of symmetry)
CFN	Düse bei kritischem Durchfluss (en: critical flow nozzle)
DCM	Durchmesserkorrekturmethode (en: diameter correction method)
HPN	Hochpräzisionsdüse (en: high precision nozzle)
NPN	normale Präzisionsdüse (en: normal precision nozzle)
IP	Eintrittsebene (en: inlet plane)
PUP	Phänomen der vorzeitigen Entdrosselung (en: premature unchoking phenomenon)
TLS	Oberflächentangente (en: tangential line of surface)

5 Grundgleichungen

5.1 Gasverhalten

5.1.1 Isentroper Prozess

Druck, Temperatur und Dichte des Gases im isentropen Prozess stehen wie folgt miteinander in Beziehung:

$$\frac{p^{\gamma-1}}{T^{\gamma}} = \text{konst.} \quad (1)$$

$$\frac{p}{\rho^{\gamma}} = \text{konst.} \quad (2)$$

5.1.2 Zustandsgleichung

Das Verhalten von Realgas wird wie folgt beschrieben:

$$\frac{p}{\rho} = \left(\frac{RZ}{M} \right) T \quad (3)$$

5.2 Isentrope Strömung eines idealen Gases

5.2.1 Strömungsquerschnitt

Der Strömungsquerschnitt steht in folgender Beziehung zur lokalen Mach-Zahl:

$$A = \frac{1}{M_a} \left[\frac{(\gamma-1)M_a^2 + 2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma+1}{2\gamma-1}} A_{nt} \quad (4)$$

5.2.2 Statischer Druck

Der statische Druck steht in folgender Beziehung zur lokalen Mach-Zahl:

$$p = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_a^2 \right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} p_0 \quad (5)$$

5.2.3 Statische Temperatur

Die statische Temperatur steht in folgender Beziehung zur lokalen Mach-Zahl:

$$T = \frac{2}{2 + (\gamma-1)M_a^2} T_0 \quad (6)$$

5.3 Theoretische Variablen am kritischen Punkt

5.3.1 Allgemeines

Die theoretischen Variablen am kritischen Punkt werden unter der Annahme einer isentropen Strömung eines idealen Gases abgeleitet.

5.3.2 Kritischer Druck

Der theoretische statische Druck am kritischen Punkt ergibt sich wie folgt:

$$p_p^* = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} p_0 \quad (7)$$

5.3.3 Kritische Temperatur

Die theoretische statische Temperatur am kritischen Punkt ergibt sich wie folgt:

$$T_p^* = \frac{2}{\gamma+1} T_0 \quad (8)$$

5.3.4 Kritische Dichte

Der theoretische Dichte am kritischen Punkt ergibt sich wie folgt:

$$\rho_p^* = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \rho_0 \quad (9)$$

5.3.5 Kritische Geschwindigkeit

Die theoretische Strömungsgeschwindigkeit am kritischen Punkt ergibt sich wie folgt:

$$c_p^* = \sqrt{\gamma \frac{R}{M} T_p^*} \quad (10)$$

5.4 Theoretischer Massendurchfluss

5.4.1 Allgemeines

Der theoretische Massendurchfluss wird unter der Annahme einer eindimensionalen isentropen Strömung eines idealen oder eines realen Gases abgeleitet.

5.4.2 Theoretischer Massendurchfluss eines idealen Gases

Der theoretische Massendurchfluss eines idealen Gases definiert sich über das Produkt aus dem Strömungsquerschnitt, der lokalen Schallgeschwindigkeit und der Dichte am kritischen Punkt unter der Annahme einer eindimensionalen isentropen Strömung eines idealen Gases, d. h. $Z = 1$ und $k = \gamma$, woraus sich die folgende Gleichung ergibt:

$$q_{thP} \equiv A^* c_p^* \rho_p^* = A^* C_p^* \frac{p_0}{\sqrt{\left(\frac{R}{M}\right) T_0}} \quad (11)$$

5.4.3 Theoretischer Massendurchfluss eines realen Gases

Der theoretische Massendurchfluss eines realen Gases definiert sich über das Produkt aus dem Strömungsquerschnitt, der lokalen Schallgeschwindigkeit und der Dichte am kritischen Punkt unter der Annahme einer eindimensionalen isentropen Strömung eines realen Gases, woraus sich die folgende Gleichung ergibt:

$$q_{thR} \equiv A^* c^* \rho^* = A^* C^* \frac{p_0}{\sqrt{\left(\frac{R}{M}\right) T_0}} \quad (12)$$

5.5 Massendurchfluss

Der Massendurchfluss einer CFN ergibt sich wie folgt:

$$q_m = C_d q_{thR} \quad (13)$$

oder

$$q_m = C_d (A^* C_D^* \sqrt{p_0 \rho_0}) \quad (14)$$

6 Allgemeine Anforderungen

- 1) Die Strömung muss stationär und einphasig sein, ohne dass Kondensation am kritischen Punkt (Halsteil) auftritt.
- 2) An der CFN ist ein ausreichend niedriges Ausgangsdruckverhältnis herzustellen, um die kritische Strömung aufrechtzuerhalten.

ANMERKUNG Das übliche Druckverhältnis, das für den Betrieb der CFN mit einem ausreichend langen Diffusor erforderlich ist, darf bei hohen Reynolds-Zahlen, z. B. größer als 2×10^5 (entspricht einer CFN mit etwa 50 m³/h bei Atmosphärendruck), etwa 0,8 betragen; oft ist es jedoch erforderlich, das Verhältnis bei niedrigen Reynolds-Zahlen niedriger als 0,5 oder manchmal bei sehr niedrigen Reynolds-Zahlen bei 0,25 zu halten (siehe Abschnitt 11 und Anhang H).

- 3) Die thermodynamischen Eigenschaften des Gases, C^* und M (oder C_D^* und r bei Verwendung eines Dichtemessgeräts), sind mit geringen Messunsicherheiten anzugeben (siehe 10.4).

ANMERKUNG Für ein Gasgemisch ist eine genaue Gaszusammensetzung erforderlich, um C^* mit einer ausreichend geringen Messunsicherheit zu berechnen.

Können die folgenden Anforderungen nicht erfüllt werden, muss die Strömung der CFN unter denselben Bedingungen wie bei ihrem Einsatz kalibriert werden.

- 4) Das Gas sollte keinen signifikanten Relaxationseffekt zeigen (siehe Abschnitt B.5).
- 5) Die Temperatur des Gases und die Temperatur der CFN sollten stabil sein (siehe J.3.4.1).
- 6) Die Form und Oberfläche der Engstelle und des Halsteils sollten so präzise gearbeitet sein, wie in Abschnitt 8 festgelegt (siehe Anhang G).
- 7) Die Form der CFN wird regelmäßig überprüft, besonders an der Engstelle und am Halsteil (siehe Anhang G).

ANMERKUNG Die Engstelle und das Halsteil können sich durch den Einfluss der im Gas enthaltenen Feststoffe mit der Zeit verformen.

Die Engstelle und das Halsteil müssen ihre Sauberkeit und folglich ihre Oberflächenbeschaffenheit beibehalten. Wenn dies nicht sichergestellt werden kann, dann darf keine Übereinstimmung zwischen der Messung und dieser Internationalen Norm beansprucht werden und es wird eine Durchflusskalibrierung empfohlen.

7 Anwendungen, für die das Messverfahren geeignet ist

Jede Anwendung sollte bewertet werden, um festzustellen, ob eine CFN geeignet oder eine andere Einrichtung besser geeignet ist.

Die gebräuchlichsten Anwendungen für CFNs sind die Verwendung als Arbeits- oder Referenzstandards zur Kalibrierung anderer Messgeräte, als Prüf- oder Transferstandards zur Überprüfung oder zum Vergleich von Kalibriereinrichtungen, als Regler für Durchflüsse und so weiter.

Wichtige Aspekte dabei sind:

- 1) der Massendurchfluss und der Volumendurchfluss der CFN sind dabei von den Bedingungen in der Nachlaufleitung unabhängig;
- 2) der Volumendurchfluss der Leitung, in welche die CFN eingebaut ist, ist bei jedem Vordruck nahezu konstant, sofern die Temperatur konstant ist.

ANMERKUNG Mehrere in Reihe geschaltete CFNs (z. B. bei der Raumkonfiguration) sind erforderlich, um den Volumendurchfluss im CFN-System zu verändern (siehe 9.3 und J.7 (2)).

Weitere Aspekte sind:

- 3) präzise Druck- und Temperaturmessungen (oder Dichtemessung bei Einsatz eines Dichtemessgeräts) sind nur an der Einlaufstelle der CFN erforderlich;
- 4) der Nachdruck sollte überwacht oder abgeschätzt werden, um zu bestätigen, dass die CFN gedrosselt wird;
- 5) der Massendurchfluss der CFN verhält sich proportional zum Ruhedruck in der Einlaufleitung, d. h. der maximale erreichbare Massendurchfluss der CFN wird praktisch durch die maximalen Drücke in der Einlaufleitung begrenzt.

8 CFN

8.1 Allgemeine Anforderungen an beide Standardausführungen

8.1.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt legt die allgemeinen Anforderungen an CFNs mit Toroid- und Zylinderhals fest.

Um den Durchfluss mit der in 10.3.2 festgelegten Messunsicherheit und mithilfe des in 10.3.1 festgelegten Durchflusskoeffizienten zu messen, muss die CFN den Anforderungen von 8.1.2 bis 8.1.4 und 8.2 entsprechen.

Form und Abmessungen sind durch CMM obligatorisch zu überprüfen, und wenn die in diesem Abschnitt festgelegten Fertigungstoleranzen einschließlich der Rauigkeit nicht erreicht oder durch Inspektionen überprüft werden können, wird eine Durchflusskalibrierung empfohlen.

8.1.2 Werkstoffe

Die CFN muss aus Werkstoffen hergestellt sein, die für die bestimmungsgemäße Anwendung geeignet sind. Einige Überlegungen hierzu sind:

- a) dass es möglich sein sollte, die Oberfläche so zu beschichten oder zu bearbeiten, dass der in 8.1.3 und 8.2 geforderte Zustand erreicht wird;

ANMERKUNG Einige Werkstoffe sind wegen Grübchen, Hohlräumen und mangelnder Homogenität ungeeignet.

- b) dass der Werkstoff nach einer Oberflächenbehandlung bei bestimmungsgemäßer Verwendung nicht korrodieren darf;
- c) dass der Werkstoff formstabil sein sollte und bekannte und reproduzierbare Wärmeausdehnungseigenschaften haben sollte, damit die Korrektur des Halsdurchmessers in Gleichung (16) vorgenommen werden kann.

8.1.3 Engstelle und Halsteil

Die Engstelle und das Halsteil der CFN müssen wie folgt ausgelegt sein:

- a) achsensymmetrisch um die Mittellinie (Symmetrieachse, AOS) der CFN;
- b) glatt geschliffen, so dass sich folgende Oberflächenrauigkeit ergeben sollte:
 - für $d_{nt} > 13 \text{ mm}$: $R_a = 15 \times 10^{-6} d_{nt}$ als eine maximale Anforderung;
 - für $d_{nt} \leq 13 \text{ mm}$: $R_a = 200 \text{ nm}$ als eine maximale Anforderung;
- c) frei von Schmutz oder anderen Verunreinigungen.

Es ist schwierig, die Engstelle und das Halsteil entsprechend den Festlegungen zu bearbeiten, von denen der Durchflusskoeffizient direkt abhängt, und auch den Halsdurchmesser genau zu messen, besonders bei kleinen Düsen, weshalb große Sorgfalt angewendet werden sollte.

Große Sorgfalt ist auch beim Polieren der Engstelle und des Halsteils geboten, da dies zu einer erheblichen Formänderung der Oberfläche führen kann.

8.1.4 Diffusor

Die einzige Anforderung an den Diffusor ist, dass er die Strömung am Halsteil nicht stören darf; deshalb ist die Form des Diffusors nicht festgelegt.

Neben dem herkömmlichen Diffusor erlaubt die Anforderung keinen anderen Diffusor, keinen abnehmbaren Diffusor [3] und keine Stufen genau am Halsteil und/oder im Diffusor [14] (siehe J.8.1.4).

Der herkömmliche Diffusor sollte aus einem Stück gefertigt und in die Düse integriert sein. Er sollte so überwacht werden, dass Stufen, Fehlstellen, Unregelmäßigkeiten und mangelnde Konzentrizität nicht mehr als 1 % des lokalen Durchmessers ausmachen. Die Länge sollte nicht weniger als d_{nt} betragen. Wenn es eine Durchmesserunterbrechung im Diffusor gibt, dann sollte der Durchmesser stromabwärts zunehmen (nicht abnehmen). Der arithmetische Mittelwert der Rauigkeit des konisch auseinanderlaufenden Teils sollte $10^{-4} d_{nt}$ nicht überschreiten. Im angegebenen Reynolds-Zahlenbereich kann das kritische Ausgangsdruckverhältnis eines herkömmlichen Diffusors nach Abschnitt 11 abgeschätzt werden.

Ein bestimmtes Ereignis (Phänomen der vorzeitigen Entdrosselung, PUP, siehe Anhang H) beeinträchtigt die Diffusorleistung in unvorhersehbarer Weise bei niedrigen Reynolds-Zahlen [6]–[12]. Wenn das kritische Ausgangsdruckverhältnis für den Betrieb des Systems bei niedrigen Reynolds-Zahlen, z. B. kleiner als 2×10^5 , von wesentlicher Bedeutung ist, sollte das tatsächliche kritische Ausgangsdruckverhältnis experimentell gemessen werden, wobei die CFN mit ihrer eigenen Leitung für die Anwendung verwendet werden sollte, da das Ereignis erheblich von einem geringen Unterschied der CFN-Form und/oder der CFN-Beschaffenheit sowie von ihren Einbaubedingungen abhängen kann [11] [13].

Es wird empfohlen, die Länge des Diffusors so groß wie möglich zu gestalten [10], mindestens $4 d_{nt}$, um das Risiko des Auftretens von PUP zu reduzieren. Falls der Diffusor abnehmbar ist, kann er durch einen längeren Diffusor ausgetauscht werden, sofern der Bedarf hierfür aufkommt. Zusätzliche abnehmbare Diffusoren dürfen hinter dem integrierten Diffusor angebracht werden, ohne dass sie den Durchflusskoeffizienten beeinflussen (siehe Bild J.1).

Der Diffusoreinlauf muss, unabhängig davon, ob der Diffusor fest verbaut oder abnehmbar ist, sehr vorsichtig bearbeitet werden, um das Halsteil nicht zu beschädigen oder zu verstopfen, genau wie beim Anbringen des abnehmbaren Diffusors.

8.2 Anforderungen an die Standardausführungen

8.2.1 Standard-CFNs

Es gibt zwei Formen von Standard-CFNs:

- 1) CFN mit Toroidhals;
- 2) CFN mit Zylinderhals.

Zusätzlich zu den Anforderungen von 8.1 müssen CNFs mit Toroid- und Zylinderhals den Anforderungen von 8.2.2 bzw. 8.2.3 entsprechen.

8.2.2 CFN mit Toroidhals

8.2.2.1 Zusätzlich zu den Anforderungen von 8.1 muss die CFN mit Toroidhals den Anforderungen von 8.2.2.2 bis 8.2.2.7 entsprechen. Die Anforderungen sind in Bild 1 zusammengefasst.

8.2.2.2 Die Eintrittsebene (IP) ist definiert als die physische oder virtuelle Ebene senkrecht zur Symmetrieachse der Düse mit einem Schnittpunkt mit der Engstelle in einem Durchmesser von $(2,5 \pm 0,1) d_{nt}$ unabhängig von der Form vor der IP.

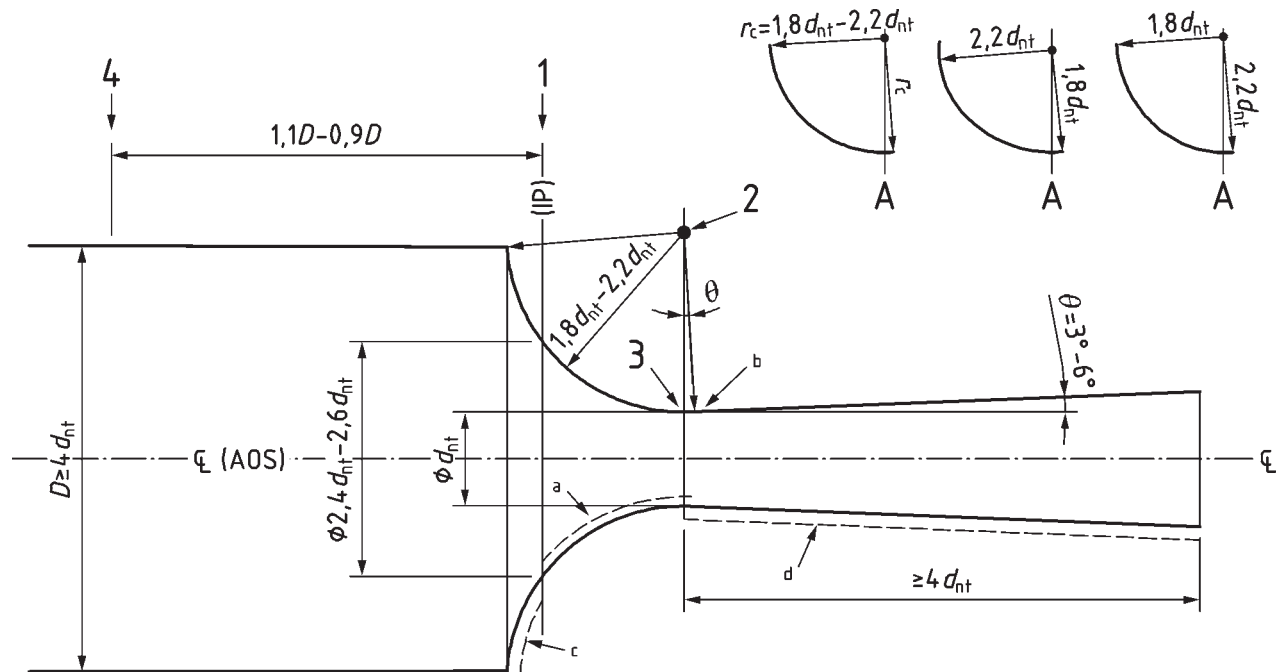
8.2.2.3 Die Engstelle hinter der Eintrittsebene muss ein Teil eines Torus sein. Am Halsteil muss die Oberflächentangente (TLS) parallel zur Symmetrieachse der Düse verlaufen. Eine kurzer Torus, bei dem die Oberflächentangente des Halsteils nicht parallel zur Symmetrieachse der Düse verläuft, muss vermieden werden, da dies bei einem sehr kleinen Defizit zu einem schwerwiegenden Fehler führen kann. Um das Risiko einer Beschädigung des Halsteils bei der Anwendung zu verringern, erstreckt sich der Torus vorzugsweise über das Halsteil hinaus bis zu einem gewissen Grad in den Diffusorteil, z. B. bis ca. $0,1 d_{nt}$ hinter das Halsteil, wobei die TLS des Torus-Endes etwa 3° zur Symmetrieachse der Düse beträgt.

8.2.2.4 Wenn der Diffusor in einem Stück in die Düse integriert ist, ist bei der Bearbeitung des Diffusors hinter dem Halsteil große Vorsicht geboten, da schon ein geringes Spiel der Drehmaschine unerwartete Formen genau am Halsteil erzeugen kann, die sich erheblich auf den Durchflusskoeffizienten auswirken können. Nach der Bearbeitung sollte eine sorgfältige Inspektion der Halsform durchgeführt werden, und wenn dann eine Unregelmäßigkeit am Halsteil festgestellt wird, sollte die Strömung in der CFN kalibriert werden.

8.2.2.5 Die Form vor der IP ist nicht festgelegt, sofern sie die Strömung in der Engstelle nicht stört; sie sollte jedoch achsensymmetrisch sein und ihre Oberfläche sollte an jeder axialen Stelle einen Durchmesser haben, der größer oder gleich der Ausdehnung des Torus hinter der IP ist.

8.2.2.6 Der Torus-Radius zwischen der Eintrittsebene und dem Halsteil kann konstant sein oder darf gleichmäßig zwischen $1,8 d_{nt}$ und $2,2 d_{nt}$ variieren, sofern ein variierender Radius die Strömung im Halsteil nicht stört. Beispiele für den Torus mit konstanten und mit variablen Radien sind in Bild 1 dargestellt.

8.2.2.7 Der Halbwinkel eines herkömmlichen Diffusors sollte zwischen $2,5^\circ$ und $6,0^\circ$ liegen, und sich gleichmäßig mit dem Torus-Ende bei gleicher TLS wie in Bild 1 berühren.



Legende

- 1 Eintrittsebene (IP) (Definition, braucht keine physische Ebene zu sein, siehe 8.2.2.2)
- 2 Mittelpunkt des Einlaufs am Torus
- 3 Halsteil
- 4 Lage der Druckentnahmestelle
- A Beispiele für den Einlauf am Torus (konstante und variable Radien)
- a siehe 8.2.2.3 und 8.2.2.6
- b Kontaktebene zwischen Einlauf am Torus und herkömmlichem Diffusor (übliche Ausführung)
- c siehe 8.2.2.5 (übliche Ausführung)
- d siehe 8.2.2.7 und 8.1.4 (übliche Ausführung)

Bild 1 — CFN mit Toroidhals

8.2.3 CFN mit Zylinderhals

8.2.3.1 Zusätzlich zu den Anforderungen von 8.1 muss die CFN mit Zylinderhals den Anforderungen von 8.2.3.2 bis 8.2.3.10 entsprechen. Die Anforderungen sind in Bild 2 zusammengefasst.

8.2.3.2 Die Eintrittsebene (IP) ist definiert als die physische Ebene an der Vorderseite der Düse.

8.2.3.3 Die Engstelle muss ein Viertel eines Torus sein, der einerseits tangential zur IP und andererseits tangential zum Halsteil verläuft.

8.2.3.4 Die Engstelle muss eine Krümmung von d_{nt} aufweisen und darf nicht mehr als $\pm 0,001 d_{nt}$ vom Torus abweichen.

8.2.3.5 Das Halsteil muss zylinderförmig mit der Länge d_{nt} und dem Durchmesser d_{nt} sein.

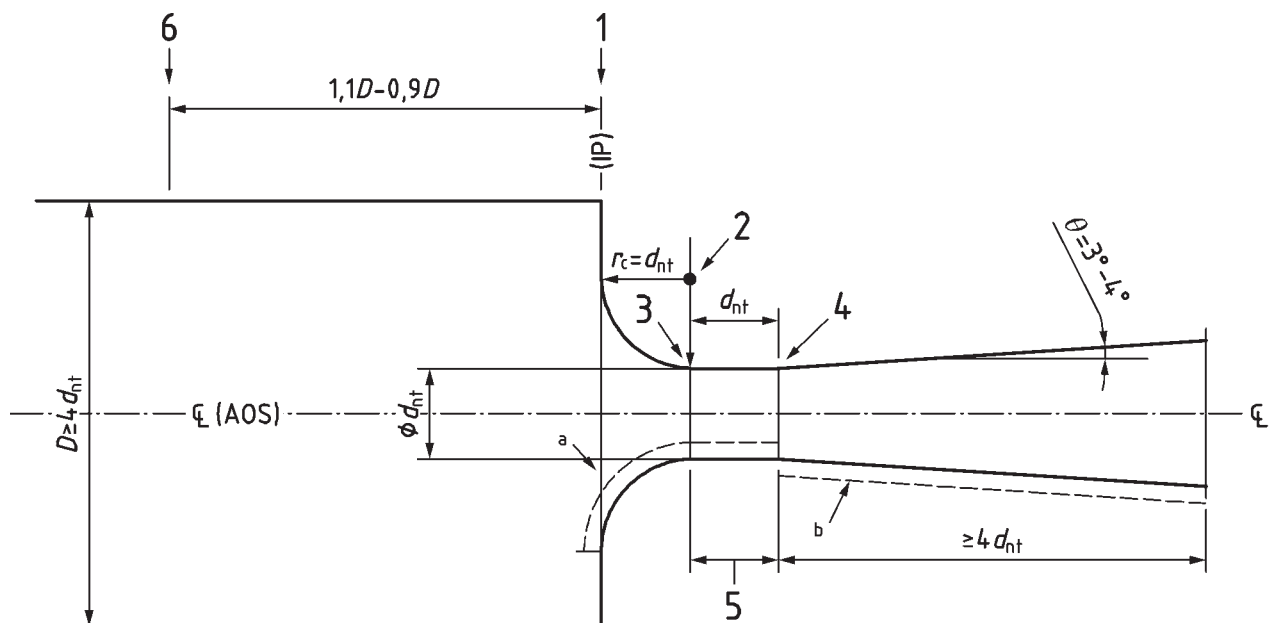
8.2.3.6 Der Halsdurchmesser d_{nt} muss durch den mittleren Durchmesser am Halsauslauf definiert werden. Der mittlere Durchmesser muss durch die Messung von mindestens vier gleichwinklig verteilten Durchmessern am Auslauf des Zylinderhalses bestimmt werden. Kein Durchmesser entlang des Halsteils darf um mehr als $\pm 0,001 d_{nt}$ vom mittleren Durchmesser abweichen.

8.2.3.7 Der Übergang von der Engstelle zum Halsteil sollte untersucht werden, um zu überprüfen, ob der lokale Radius der Oberfläche r_c in der Ebene, in der die Symmetrieachse der Düse liegt, nicht kleiner als $0,5 d_{nt}$ über den Umfang ist, der von der Kontaktebene der Engstelle mit dem Halsteil gebildet wird. Bild 3 veranschaulicht diese Anforderung.

8.2.3.8 Die Länge des Halsteils darf nicht mehr als $0,05 d_{nt}$ von d_{nt} abweichen. Die Verbindung zwischen dem Halsteil und dem Diffusor muss ebenfalls auf Fehler untersucht werden.

8.2.3.9 Die Oberfläche der Engstelle und des Halsteils muss ordentlich poliert werden, sodass der arithmetische Mittelwert der Rauigkeit $15 \times 10^{-6} d_{nt}$ nicht überschreitet, sofern er gemessen werden kann.

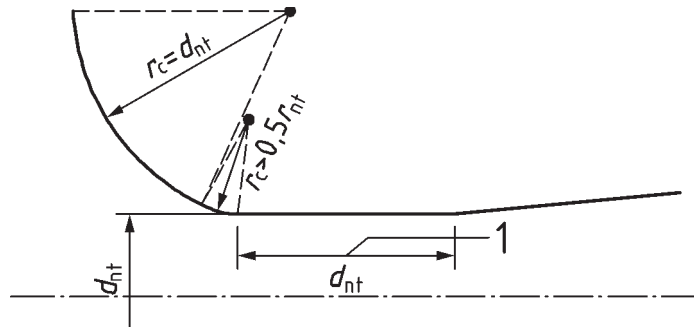
8.2.3.10 Der Halbwinkel eines herkömmlichen Diffusors sollte zwischen 3° und 4° liegen.



Legende

- 1 Eintrittsebene (physische Ebene)
- 2 Mittelpunkt des Einlaufs am Torus
- 3 Halseinlauf
- 4 Halsausgang
- 5 Halsteil
- 6 Lage der Druckentnahmestelle
- a Zylinderhals
- b In diesem Bereich darf der arithmetische Mittelwert der Rauigkeit R_a $15 \times 10^{-6} d_{nt}$ nicht überschreiten und die Kontur darf von der Torus- und Zylinderform nicht mehr als $\pm 0,001 d_{nt}$ abweichen.
- c Die Länge sollte größer sein als d_{nt} , aber vorzugsweise nicht größer als $4 d_{nt}$.

Bild 2 — CFN mit Zylinderhals



Legende

1 Halsteil

Bild 3 — Einzelheit der Verbindung zwischen Vierteltorus und Zylinderhals (Übergangsbereich)

9 Einbauanforderungen

9.1 Allgemeine Anforderungen an beide Standardkonfigurationen

9.1.1 Standardkonfigurationen

Die CFN muss in einer der beiden folgenden Konfigurationen eingebaut werden:

- a) der Rohrkonfiguration: ein Rohr mit kreisrundem Querschnitt mit $\beta \leq 0,25$; oder
- b) der Kammerkonfiguration: ein großes Volumen (Kammer oder Raum) vor der CFN, sodass b effektiv null ist.

Die Rohrkonfiguration darf nur eine einzige CFN enthalten und muss den Anforderungen von 9.2 und 9.1.2 bis 9.1.7 entsprechen.

Die Kammerkonfiguration darf mehrere gruppierte CFN enthalten und muss den Anforderungen von 9.3 und 9.1.2 bis 9.1.7 entsprechen.

9.1.2 Druckentnahmestelle im Einlaufrohr

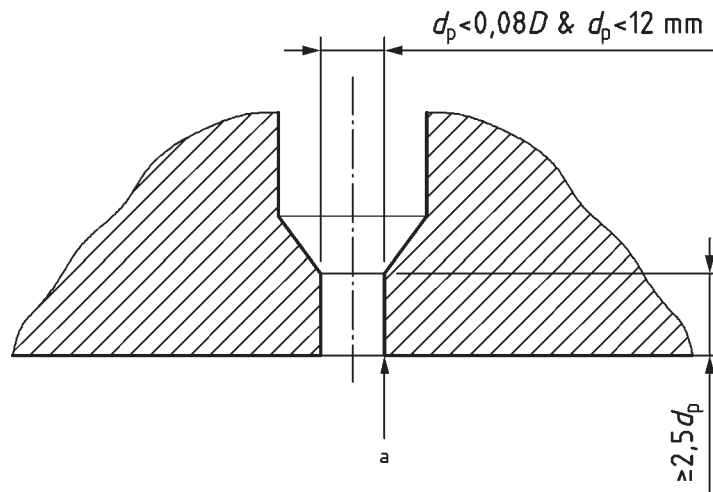
Der statische Druck im Einlaufrohr der CFN muss durch eine oder mehrere Wand-Druckentnahmestelle(n), die durch die Rohr- bzw. Kammerwand vor der CFN gebohrt wurde(n), gemessen werden.

Die Wand-Druckentnahmestellen dürfen vor oder hinter den in 9.2.3 und 9.3.3 festgelegten Stellen liegen, vorausgesetzt, dass bewiesen wurde, dass der gemessene Druck zuverlässig verwendet werden kann, um den Ruhedruck im Einlaufrohr zu ermitteln (siehe J.3.4.1).

Wenn die Strömung an den Druckentnahmestellen nicht in Ruhe angenähert werden kann, z. B. $\beta < 0,15$, muss die Entnahmebohrung die folgenden Anforderungen erfüllen, die in Bild 4 zusammengefasst sind:

- a) die Mittellinie muss senkrecht zur Symmetrieachse der Düse verlaufen;
- b) der Querschnitt der Bohrung in der Leitung muss kreisförmig sein;
- c) die Form in der Wand muss zylindrisch sein, mit einer Mindestlänge von $2,5 d_p$ von der Bohrung, wobei d_p der Durchmesser der Bohrung ist;
- d) die Kante der Bohrung muss rechtwinklig oder mit einem Radius von nicht mehr als $0,1 d_p$ abgerundet sein; und
- e) die Kante der Bohrung muss frei von Graten sein.

Mithilfe einer Sichtprüfung ist zu bestätigen, dass diese Anforderungen erfüllt sind.



Legende

- a Bohrungskante, bündig mit der Innenfläche der Rohrleitung, gratfrei und rechtwinklig oder mit einem Radius, der $0,1 d_p$ nicht überschreitet

Bild 4 — Einzelheiten der Wand-Druckentnahmestelle

9.1.3 Druckentnahmestelle am Auslaufrohr

Der Druck im Auslaufrohr muss durch eine oder mehrere Wand-Druckentnahmestelle(n) gemessen oder muss abgeschätzt werden, um sicherzustellen, dass die Düse bzw. alle Düsen gedrosselt ist/sind. Die Druckentnahmestellen sollten nicht direkt in die Strömung des CFN-Ausgangs hineinragen.

Bei einigen Anwendungen kann der Austrittsdruck ohne die Verwendung von Wand-Druckentnahmestellen bestimmt werden, z. B. wenn die CFN direkt in einen großen Raum mit bekanntem Druck, z. B. in die Atmosphäre oder in einen großen Tank, ausmündet, darf der Druck im Auslaufrohr der CFN durch den Druck in dem großen Raum dargestellt werden.

9.1.4 Messung der Temperatur

Die Temperatur im Einlaufrohr muss unter Verwendung eines Temperaturfühlers oder mehrerer Temperaturfühler gemessen werden, die sich im Einlaufrohr der CFN befinden. Die Temperatur im Auslaufrohr braucht nicht gemessen zu werden.

Der Temperaturfühler darf die Messung des Drucks im Einlaufrohr nicht stören; um dies sicherzustellen, darf der Temperaturfühler nicht mit der Einlaufrohr-Druckentnahmestelle in Strömungsrichtung ausgerichtet werden.

Besondere Sorgfalt ist bei der Auswahl des Temperaturfühlers und der Isolierung der Leitung anzuwenden, wenn die Ruhetemperatur des Gasstroms erheblich von der Umgebungstemperatur abweicht, z. B. um mehr als 5 K. In solchen Fällen muss der Temperaturfühler unempfindlich gegenüber dem Einfluss der Wärmestrahlung sein und die Leitung muss gut wärmeisoliert sein, um die Wärmeübertragung zwischen dem Gasstrom und der Umgebung auf ein Mindestmaß zu begrenzen (siehe J.3.4.1). Unterscheiden sich die Temperaturen des Gasstroms und der Leitung erheblich, ist es sehr schwierig, die Gastemperatur genau zu messen. Die Wärmeleitung von der Leitung zum Temperaturfühler muss auf ein Mindestmaß begrenzt werden.

9.1.5 Messung der Dichte

Bei einigen Anwendungsfällen kann es erwünscht sein, die Gasdichte vor der Düse direkt zu messen, z. B. wenn die molare Masse des Gases nicht mit ausreichender Genauigkeit bekannt ist. Das Dichtemessgerät muss vor den Druck- und Temperatur-Entnahmestellen am Einlaufrohr installiert werden.

Um den Durchfluss präzise zu messen, muss auf Folgendes besonders geachtet werden:

- a) das Dichtemessgerät darf die Messungen des statischen Drucks und der statischen Temperatur im Einlaufrohr nicht stören;
- b) befindet sich das Dichtemessgerät in einer Bypass-Leitung des Einlaufrohrs oder einer CFN-Kammer, sind Kontrollen durchzuführen, um sicherzustellen, dass das Gas im Dichtemessgerät dasselbe ist wie das, das durch die Rohrleitung oder die Kammer strömt.
- c) Um den Korrekturaufwand auf ein Mindestmaß zu begrenzen, sollten der Druck und die Temperatur am Dichtemessgerät dem Druck und der Temperatur im Einlaufrohr der CFN so nahe wie möglich kommen. Die Ruhedichte der CFN muss wie folgt berechnet werden:

$$\rho_0 = \rho_{\text{den}} \frac{p_0}{p_{\text{den}}} \frac{T_{\text{den}}}{T_0} \frac{Z_{\text{den}}}{Z_0} \quad (15)$$

9.1.6 Entleerungsbohrung

Das Rohr bzw. die Kammer darf mit Entleerungsbohrungen versehen sein, um Kondensat oder andere Fremdstoffen, die sich bei einigen Anwendungsfällen ansammeln können, zu entfernen. Während der Messung darf durch diese Entleerungsbohrungen keine Strömung stattfinden.

Die Entleerungsbohrungen müssen sich vor den Wand-Druckentnahmestellen im Einlaufrohr in einer axialen Ebene, die sich von der der Wand-Druckentnahmestellen unterscheidet, befinden, um die Messung des statischen Drucks im Einlaufrohr nicht zu stören.

Die Entleerungsbohrungen sollten vorzugsweise den Festlegungen für Druckentnahmestellen entsprechen, die in Bild 4 dargestellt sind. Der Achsenabstand zwischen der Entleerungsbohrung und der Ebene des Einlaufs der Wand-Druckentnahmestelle muss größer als 1 D sein.

9.1.7 Bedingungen im Nachlaufrohr

Es gibt keine Festlegungen für die Bedingungen im Nachlaufrohr und in der Nachlaufkammer, sofern sie die kritische Strömung in der CFN bzw. in den CFNs nicht stören.

9.2 Rohrkonfiguration

9.2.1 Allgemeines

Zusätzlich zu den Anforderungen von 9.1 muss die Rohrkonfiguration den Anforderungen von 9.2.2 bis 9.2.4 entsprechen. Die Anforderungen sind in Bild 5 zusammengefasst.

9.2.2 Einlaufrohr

Das Einlaufrohr:

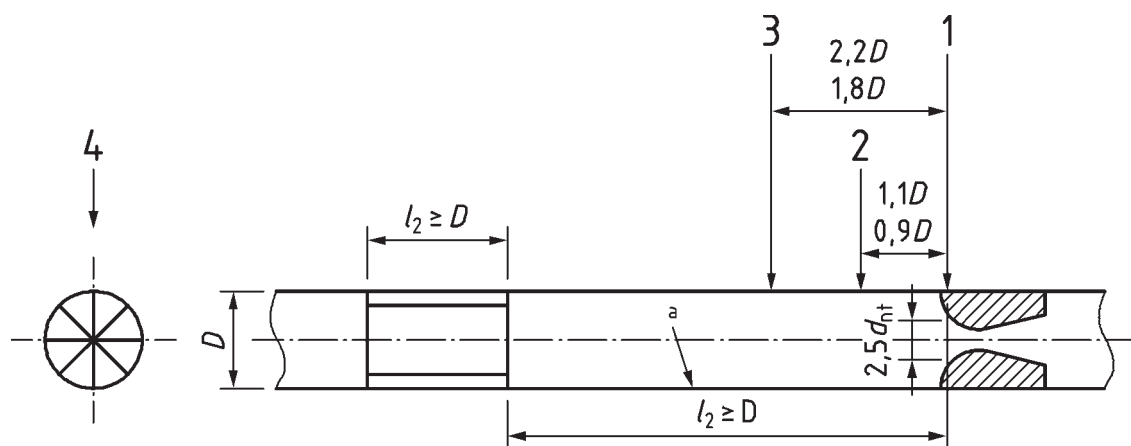
- a) muss gerade sein;
- b) muss einen kreisförmigen Querschnitt besitzen;

- c) muss innerhalb von $\pm 0,02 D$ konzentrisch um die Symmetrieachse der Düse sein;
- d) muss einen Durchmesser von mehr als $4 d_{nt}$ besitzen ($\beta \leq 0,25$);
- e) darf nicht mehr als $0,01 D$ für bis zu $3 D$ vor der Eintrittsebene von der Rundheit abweichen; und
- f) muss einen arithmetischen Mittelwert der Rauigkeit von weniger als $10^{-4} D$ für bis zu $3 D$ vor der Eintrittsebene besitzen.

Falls diese Anforderungen nicht erfüllt werden können, werden spezielle Prüfungen empfohlen, um den Einfluss der Einbaubedingungen zu untersuchen, oder um C_d durch Durchflusskalibrierung mit demselben Rohr zu bestimmen.

In dem Fall, dass $\beta > 0,25$, darf der nach Abschnitt 10 berechnete Massendurchfluss nach Anhang D korrigiert werden; besondere Vorsicht ist jedoch geboten, da die Messung des statischen Drucks eines schnell fließenden Stroms je nach Lage, Form und/oder Qualität der Druckentnahmestelle leicht zu einem schweren Fehler führen kann. Darüber hinaus kann die Mehrdeutigkeit des Rückgewinnungsfaktors die Messung erheblich beeinflussen und auch der Druckabfall zwischen der Druckentnahmestelle im Einlaufrohr und der Eintrittsebene ist möglicherweise nicht zu vernachlässigen (siehe J.3.1.4).

Im Einlaufrohr dürfen keine Wirbel auftreten. Wenn im Einlaufrohr eine gewisse Strömungsgeschwindigkeit vorhanden ist, können wirbelfreie Bedingungen sichergestellt werden, indem ein Strömungsgleichrichter mit der in Bild 5 gezeigten Bauart (Étoile-Gleichrichter) in einem Abstand $l_1 > 5 D$ vor der Eintrittsebene eingebaut wird. In Übereinstimmung mit ISO 5167-1 dürfen auch andere Strömungsumformer am Einlauf eingebaut werden [1] [2].



Legende

- 1 IP (Eintrittsebene)
- 2 Lage der Druckentnahmestelle
- 3 Lage des Temperaturfühlers
- 4 Étoile-Gleichrichter mit ausreichender Lamellendicke, um ein Ausknicken zu verhindern (wenn die Strömungsgeschwindigkeit in der Leitung nicht vernachlässigbar ist)
- a In diesem Bereich darf die Oberflächenrauigkeit $10^{-4} D$ nicht überschreiten.

Bild 5 — Einbauanforderungen in einem Rohr

9.2.3 Messung des Drucks

Die Druckentnahmestelle im Einlaufrohr sollte zwischen $0,9 D$ und $1,1 D$ vor der Eintrittsebene liegen.

Gibt es mehrere Entnahmestellen, müssen alle in einer Ebene senkrecht zur Symmetrieachse der Düse liegen.

Der Nachdruck darf durch eine Druckentnahmestelle gemessen werden, die innerhalb von $0,5 D$ hinter dem Diffusorausgang liegt. Weiter hinten im Nachlauf vorhandene Stellen können ebenfalls genutzt werden, sofern dort keine grundsätzliche Druckänderung auftritt. Andere Entnahmestellen im Nachlauf können annehmbar sein, wenn eine Freistromprüfung (siehe Abschnitt H.4) an diesen Entnahmestellen durchgeführt wurde.

9.2.4 Messung der Temperatur

Die Temperatur im Einlaufrohr darf bei $1,8 D$ bis $2,2 D$ vor der Eintrittsebene gemessen werden. Der Durchmesser des Temperaturfühlers darf nicht größer als $0,04 D$ sein.

Falls es nicht möglich ist, einen Temperaturfühler mit einem Durchmesser kleiner als $0,04 D$ zu verwenden, so ist das Fühlerelement so anzubringen, dass es nachweislich die Druckmessung im Einlaufrohr nicht beeinträchtigt. Der Temperaturfühler darf weiter vorne angeordnet werden, sofern nachgewiesen wurde, dass die gemessene Temperatur zuverlässig genutzt werden kann, um die Ruhetemperatur am Einlauf der Düse zu ermitteln. Siehe J.3.4.1.

9.3 Kammerkonfiguration

9.3.1 Allgemeines

Zusätzlich zu den Anforderungen von 9.1 muss die Kammerkonfiguration den Anforderungen von 9.3.2 bis 9.3.5 entsprechen.

9.3.2 Einlaufkammer

Es kann davon ausgegangen werden, dass die CFN in einem großen Volumen (Kammer) eingebaut wird, wenn sich die Symmetrieachse der Düse mindestens $5 d_{nt}$ von allen Kammerwänden entfernt befindet.

Wenn mehrere CFNs in Reihe in eine Kammer eingebaut werden, muss der Mindestabstand zwischen den Symmetrieachsen aller CFNs größer sein als das 6-Fache des größten Halsdurchmessers, um Beeinträchtigungen zwischen den CFNs zu vermeiden [15]–[21]. Es wird eine Prüfung empfohlen, um sicherzustellen, dass die Leistung durch die Beeinträchtigungen zwischen CFNs und auch zwischen einer CFN und den Kammerwänden nicht herabgesetzt wird.

9.3.3 Messung des Drucks

Die Wand-Druckentnahmestelle in der Einlaufkammer sollte vorzugsweise an einer Wand senkrecht zur Eintrittsebene und in einem Abstand von $(10 \pm 1) d_{nt}$ zur Eintrittsebene liegen.

9.3.4 Messung der Temperatur

Der Temperaturfühler in der Einlaufkammer darf nicht dort angebracht werden, wo die Strömung in Ruhe verläuft, um sicherzustellen, dass die gemessene Temperatur die Temperatur des Gases darstellt, das in die CFNs strömt. Für eine große Kammer werden mehrere Temperaturfühler empfohlen, da die große Wahrscheinlichkeit einer in Ruhe verlaufenden Strömung und/oder einer Temperaturschichtung besteht.

9.3.5 Ausgangsdruckverhältnis

Sind mehrere CFNs in eine Kammer eingebaut, muss das Ausgangsdruckverhältnis innerhalb der Kammer kleiner sein als der kleinste Wert der kritischen Ausgangsdruckverhältnisse aller CFNs. Siehe Anhang H.

10 Berechnungen

10.1 Allgemeines

Entspricht die CFN den Anforderungen von Abschnitt 8 und Abschnitt 9, sollte der Massendurchfluss nach 10.2 bis 10.6 berechnet werden.

Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass angenommen wird, dass die Temperatur der CFN im Betrieb aufgrund der Isentropieannahme (siehe J.3.4.1) mit der Temperatur des Gases im Gleichgewicht ist; dementsprechend wird in dieser Internationalen Norm die Temperatur der CFN selbst durch die Temperatur des Gases angegeben. Wenn ein signifikanter Temperaturunterschied zwischen dem Gas, der CFN, der Leitung und der Umgebung festgestellt wird, sollte der Anwender von einem Experten beraten werden [56].

10.2 Berechnung des Massendurchflusses, q_m

Der Massendurchfluss einer CFN sollte nach Gleichung (13) oder nach Gleichung (14) berechnet werden; dabei sollte A_{nt} die Querschnittsfläche des Halsteils sein, wenn die CFN den Durchfluss misst, d. h. wie folgt berechnet werden:

$$A_{nt} = \frac{\pi d_{nt}^2}{4} = \frac{\pi d_{nt0}^2}{4} [1 + 2\alpha(T_1 - T_{nt0})]^2 \quad (16)$$

Es wird darauf hingewiesen, dass diese Gleichung nicht zur Korrektur des Effekts der nicht-isentropen Strömung, die durch große Temperaturunterschiede verursacht wird, geeignet ist. Siehe 10.1, J.10.1 und J.3.4.1.

10.3 Berechnung des Durchflusskoeffizienten, C_d

10.3.1 Der Durchflusskoeffizient der CFN sollte wie folgt berechnet werden:

$$C_d = (a - bR_e^{-n}) - \frac{(c - dR_e^{-n})}{1 + \exp\left(e - \frac{R_e}{f}\right)} \quad (17)$$

Die Koeffizienten a, b, c, d, e, f und n sind in Tabelle 1 für jede CFN-Ausführung angegeben (siehe Anhang F und Anhang G). Sie gelten in jedem festgelegten Reynolds-Zahlenbereich.

Tabelle 1 — Koeffizienten a, b, c, d, e, f und n

CFN mit Toroidhals	
$2,1 \times 10^4 < Re_{nt} < 3,2 \times 10^7$	$a = 0,9990$ $b = 3,415$ $c = 0,0031$ $d = 0,690$ $e = 10$ $f = 120\,000$ $n = +0,5$
CFN mit Zylinderhals	
$1,5 \times 10^5 < Re_{nt} < 1,2 \times 10^7$	$a = 1,0000$ $b = 6,341$ $c = 0,009$ für Luft $c = 0,008$ für Erdgas $d = 3,000$ $e = 6$ $f = 170\,000$ $n = +0,5$

Wenn das Gas einen signifikanten Schwingungsrelaxationseffekt hat, z. B. CO₂ und SF₆, kann der Durchflusskoeffizient mehr als 1 % verursachen, wenn die stationäre kritische Strömungsfunktion (siehe 10.4) in kleinen CFNs verwendet wird. Siehe Abschnitt B.5.

Für die Überprüfung durch Berechnung sind die Werte für den Durchflusskoeffizienten in Anhang A angegeben.

10.3.2 Die relative Unsicherheit der Durchflusskoeffizienten, die mit Gleichung (17) und Tabelle 1 berechnet wird, beträgt 0,3 % mit einem 95 %-Vertrauensniveau.

10.4 Berechnung der kritischen Durchflussfunktion, C^* oder C^*_D

Der Wert der kritischen Durchflussfunktion darf mit jeder Methode mit einer nachweislichen Genauigkeit berechnet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die meisten Methoden normalerweise davon ausgehen, dass die Zustandsänderung des Gases entlang der Strömung im Gleichgewicht ist, daher verursachen sie schwerwiegende Fehler, wenn das Gas das Gleichgewicht aufgrund der zu schnellen Zustandsänderung in der Strömung nicht erreichen kann. Siehe Abschnitt B.5.

Einige Beispiele für anwendbare Methoden zur Berechnung von C^* und C^*_D für Erdgase sind AGA-Bericht Nr. 8 [22] [23], ISO 12213 [24]–[26], und ISO 20765 [27] [28] als Zustandsgleichung. Dieser Ansatz stellt eine relative Unsicherheit von C^* von 0,1 % mit einem 95 %-Vertrauensniveau sicher. Alternativ können andere Zustandsgleichungen mit vergleichbarer Unsicherheit verwendet werden.

Die Thermodynamik-Datenbank REFPROP [42] ist eine der praktischsten und genauesten Möglichkeiten zur Berechnung von C^* . Sie führt die Berechnungen auf der Grundlage aller Zustandsgleichungen der oben genannten Normen durch. Siehe Abschnitt B.3.

Für einige Gase dürfen die Werte von C^* nach Anhang C berechnet werden, ohne eine spezielle Software zu verwenden. Die Gleichungen wurden durch Kurvenanpassungen an die von REFPROP 10.0 erzeugten Berechnungsergebnisse erhalten.

10.5 Umrechnung des gemessenen Drucks in Ruhedruck

Der Ruhedruck im Einlaufrohr, p_0 , sollte wie folgt berechnet werden:

$$p_0 = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_a^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} p_1 \quad (18)$$

Wenn $b \leq 0,15$, dann kann die Umrechnung vernachlässigt werden und p_0 ergibt sich wie folgt:

$$p_0 = p_1 \quad (19)$$

10.6 Umrechnung der gemessenen Temperatur in Ruhetemperatur

Der Ruhetemperatur im Einlaufrohr, T_0 , sollte wie folgt berechnet werden:

$$T_0 = \frac{2 + (\kappa - 1) M_a^2}{2 + R_f (\kappa - 1) M_a^2} T_1 \quad (20)$$

Wenn $\beta \leq 0,25$, dann kann der Effekt vernachlässigt werden und T_0 ergibt sich wie folgt:

$$T_0 = T_1 \quad (21)$$

Der Rückgewinnungsfaktor R_f darf mit jeder zuverlässigen Methode berechnet werden. Wenn $\beta \leq 0,25$, darf er wie folgt abgeschätzt werden:

$$R_f = \sqrt{P_r} \quad (22)$$

Dabei ist P_r die Prandtl-Zahl des Gases. Siehe J.3.2.3.

10.7 Berechnung der Viskosität

Der Wert der Viskosität darf mit jeder Methode mit einer nachweislichen Genauigkeit berechnet werden. Die REFPROP-Datenbank ist eine der praktischsten und genauesten Möglichkeiten zur Berechnung der Viskosität.

Für einige Gase darf der Wert der Viskosität nach Anhang I berechnet werden, ohne eine spezielle Software zu verwenden. Die Gleichungen wurden durch Kurvenanpassungen an die von REFPROP 10.0 erzeugten Berechnungsergebnisse erhalten.

11 Abschätzung des kritischen Ausgangsdruckverhältnisses

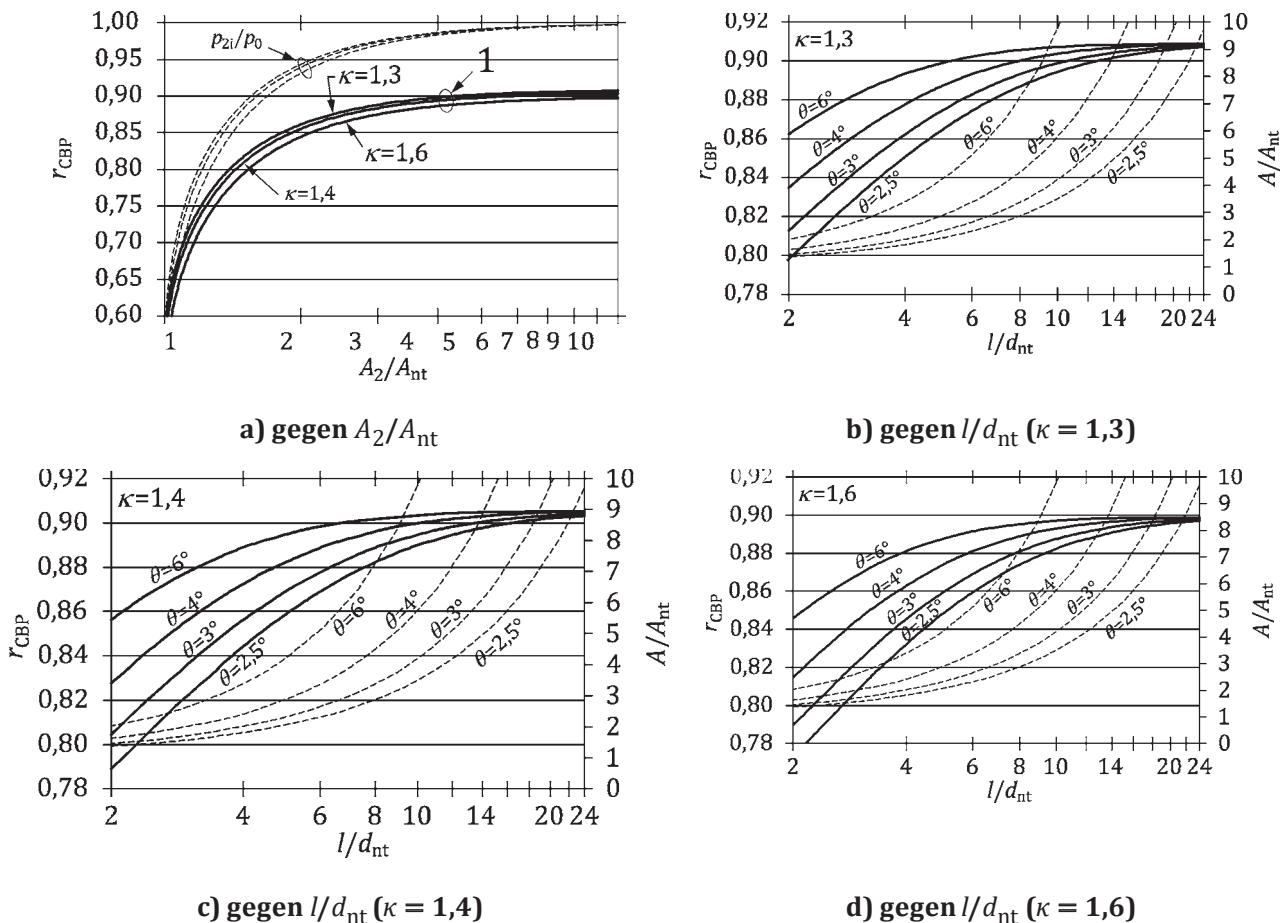
11.1 Für herkömmlichen Diffusor bei Reynolds-Zahlen höher als 2×10^5

Das kritische Ausgangsdruckverhältnis r_{CBP} für den herkömmlichen Diffusor bei Reynolds-Zahlen höher als 2×10^5 darf wie folgt abgeschätzt werden [4]:

$$r_{CBP} = 0,8 \frac{p_{2i}}{p_0} + 0,2 \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (23)$$

Dabei ist p_{2i} der theoretische statische Druck am Diffusorausgang, wenn die Düse die kritische Strömungsgeschwindigkeit erreicht, die Strömung im Diffusor aber vollkommen subsonisch ist und vollständig anliegt, wobei eine eindimensionale isentrope Strömung angenommen wird. Gleichung (23) wird in Bild 6 graphisch

dargestellt, anhand dessen die Werte von r_{CBP} unter Verwendung von A_2/A_{nt} oder der Länge des Kegelstumpfdiffusors l bei jedem Wandhalbwinkel θ geschätzt werden dürfen. Wie im Bild zu sehen ist, wird das Druckverhältnis r_{CBP} durch eine Verlängerung des Diffusors nicht wesentlich erhöht, so dass $A_2/A_{nt} > 4$, z. B. $l/d_{nt} > 7$ bei $\theta = 4^\circ$.



Legende

1 Gleichung (23)

— r_{CBP}

..... A/A_{nt}

Bild 6 — Maximal zulässiges Ausgangsdruckverhältnis r_{CBP} , berechnet mit Gleichung (23)

κ braucht nicht genau zu sein, da die Empfindlichkeit von κ nicht so hoch ist, wie in Bild 6 zu sehen ist, und Gleichung (23) nur eine Abschätzung abgibt.

Höhere Ausgangsdruckverhältnisse dürfen verwendet werden, sofern nachgewiesen werden kann, dass die CFN bei diesen Verhältnissen gedrosselt wird. Druckverhältnisse von 0,9 können bei höheren Reynolds-Zahlen erreicht werden, wenn der Diffusor lang genug ist und eine angemessene Form und Beschaffenheit hat.

11.2 Für alle Diffusoren bei niedrigen Reynolds-Zahlen

Für alle CFNs mit Diffusor ist es praktisch unmöglich, r_{CBP} bei niedrigen Reynolds-Zahlen, z. B. kleiner als 2×10^5 , vorherzusagen, da ein Phänomen der vorzeitigen Entdrosselung (PUP) auftreten kann, das zu einer starken Verringerung des Durchflusskoeffizienten durch einige schwer zu identifizierende Faktoren führt. Siehe 8.1.4 und Anhang H. Wenn die Reynolds-Zahl gesenkt wird, beginnt die durch das PUP verursachte Verringerung des Durchflusskoeffizienten bei einer für jede CFN und jeden Einbauzustand spezifischen

Reynolds-Zahl mit einem vernachlässigbaren Betrag und kann dann, abhängig von der Reynolds-Zahl, mehrere 10 % bei den Ausgangsdruckverhältnissen erreichen, bei denen die CFN theoretisch durch den Diffusoreinfluss gedrosselt werden sollte (wo das Ausgangsdruckverhältnis größer als das kritische Druckverhältnis ist). Der Betrag der Verringerung bei einem bestimmten Ausgangsdruckverhältnis bei einer bestimmten Reynolds-Zahl ist praktisch nicht vorhersehbar.

Wenn die Reynolds-Zahl in dem Bereich liegt, in dem das PUP vermutet wird, aber nicht allzu niedrig ist, sollten die meisten CFNs bei einem Ausgangsdruckverhältnis gedrosselt werden, das etwas kleiner als das kritische Druckverhältnis ist (z. B. 0,5, siehe Bild H.1); wenn sich die Reynolds-Zahl jedoch dem untersten Grenzwert dieser Internationalen Norm nähert, wird empfohlen, das Ausgangsdruckverhältnis kleiner als 0,25 zu halten [9] [10] [12].

Wenn das genaue kritische Ausgangsdruckverhältnis für den Betrieb des Systems wichtig ist, wird empfohlen, r_{CBP} unter Verwendung dieser CFN mit eigenen Einlauf- und Nachlaufleitungen zu messen (siehe J.8.1.4). Das PUP kann sehr empfindlich auf die Ausführung der CFN und auch auf ihren Einbauzustand reagieren.

11.3 Für CFNs ohne Diffusor oder mit sehr kurzem Diffusor

Für die CFNs ohne Diffusor oder mit sehr kurzem Diffusor, z. B. $l = 0,1 d_{nt}$, wird empfohlen, das Ausgangsdruckverhältnis stets kleiner als 0,35 zu halten, unabhängig von der Reynolds-Zahl. Wenn die Differenz des Durchflusses von 0,1 % für die Anwendung vernachlässigbar ist, kann das kritische Ausgangsdruckverhältnis von 0,5 (oder ein etwas kleineres Verhältnis als das kritische Druckverhältnis, siehe Bild H.5) anwendbar sein.

12 Unsicherheiten bei der Durchflussmessung

12.1 Allgemeines

Die Unsicherheit bei jeder Messung des Massendurchflusses ist ein wesentliches Kriterium und muss immer dann berechnet und angegeben werden, wenn behauptet wird, dass eine Messung mit dieser Norm übereinstimmt. Die Unsicherheit für die Messung des Massendurchflusses darf in relativen Werten als Prozentsatz, in relativen (dimensionslosen) Werten oder in absoluten Werten mit den gleichen Einheiten wie der gegebene Massendurchfluss angegeben werden. Die Unsicherheit darf als Standardunsicherheit u (mit einem 68 %-Vertrauensniveau) oder als kombinierte Standardunsicherheit u_c oder als erweiterte Unsicherheit U angegeben werden, die in der Regel das Endergebnis mit einem 95 %-Vertrauensniveau darstellt. Die mit Gleichung (8) ermittelte Unsicherheit für den Massendurchfluss wird am einfachsten mit relativen Unsicherheiten, angegeben in Prozent, bewertet. Die hier angegebenen Größen und Bezeichnungen beziehen sich auf relative Unsicherheiten, die als prozentuale Anteile des Mittelwerts angegeben werden. Unsicherheitsberechnungen sollten in Übereinstimmung mit GUM [44] durchgeführt werden.

Im Allgemeinen kann die erweiterte Unsicherheit für eine Messgröße aus der kombinierten Standardunsicherheit berechnet werden, die sich aus der relativen Unsicherheit Typ A zusammensetzt, die mithilfe von Statistiken ermittelt wird, und der relativen Unsicherheit Typ B, die mit anderen Methoden als Statistik ermittelt wird. Diese werden durch die Vektorsumme (RSS, en: root-sum-of-squares) wie folgt kombiniert:

$$U(y) = k u_c(y) = k \sqrt{u_A^2(y) + u_B^2(y)} \quad (24)$$

Dabei ist k der Erweiterungsfaktor und $k = 1$ gibt ein 68 %-Vertrauensniveau an, und $k = 2$ ist in der Regel dafür geeignet, die Unsicherheit mit einem 95 %-Vertrauensniveau zu berechnen. Die Unsicherheit Typ A ist die Standardabweichung der Wiederholungsmessungen des Massendurchflusses aus den Ergebnissen der Wiederholpräzisions- und Vergleichspräzisionsprüfung mit einem 68 %-Vertrauensniveau. Die relative Unsicherheit Typ B ergibt sich aus den Bewertungen der Unsicherheit der Elemente der Gleichung, die zur Berechnung des Massendurchflusses verwendet wird. Es ist üblich und in der Regel praktischer, Unsicherheitsberechnungen mithilfe relativer Unsicherheiten durchzuführen, wie in den folgenden praktischen Berechnungsmethoden gezeigt wird. Die Verwendung relativer Unsicherheiten ermöglicht den Einsatz

normierter Empfindlichkeitsfaktoren, die die Exponenten der jeweiligen Faktoren in der Regelgleichung für die zu bewertende Größe sind.

Bei Verwendung eines Erweiterungsfaktors $k = 2$, um ein 95 %-Vertrauensniveau zu erhalten, ist die Unsicherheit angemessen, wenn das System eine große Anzahl an Freiheitsgraden aufweist, was üblicherweise bei Unsicherheitskomponenten vom Typ B angenommen wird. Die Freiheitsgrade für die Typ A-Unsicherheitskomponente, die aus der Standardabweichung von n Wiederholungsmessungen berechnet wird, sind $n-1$, was zu höheren Werten von k führen kann, wenn die Anzahl der Wiederholungen ungefähr 20 oder weniger beträgt. Die Welch-Satterthwaite-Formel [50] ermöglicht die Berechnung der effektiven Freiheitsgrade und führt, wenn die Wiederholpräzision (Typ A-Komponente) im Verhältnis zu den Typ B-Komponenten klein ist, zu einem Erweiterungsfaktor von etwa 2 für ein 95 %-Vertrauensniveau. Für die meisten Anwendungsfälle stellt $k = 2$ einen annehmbaren Wert dar, um die Unsicherheiten mit einem 95 %-Vertrauensniveau zu ermitteln.

12.2 Praktische Berechnung der Messunsicherheit

Durch Einsetzen von Gleichung (12) in Gleichung (13) ergibt sich folgende Regelgleichung für den Massendurchfluss q_m einer CFN:

$$q_m = A \cdot C_d \cdot C^* \cdot \frac{p_0}{\sqrt{\left(\frac{R}{M}\right) T_0}} \quad (25)$$

Die Unsicherheit einer Durchflussmessung sollte aus der Standardabweichung der verfügbaren Durchflussmessdaten und den Bewertungen der Unsicherheit der einzelnen Größen in der Regelgleichung berechnet werden. In den meisten Fällen kann angenommen werden, dass die Unsicherheitskomponenten unabhängig und unkorreliert sind, aber es gibt bestimmte Fälle, in denen korrelierte Unsicherheiten ein Problem darstellen (siehe 12.3).

Da Gleichung (24) aus Produkten besteht, ist es am einfachsten, normierte Empfindlichkeitsfaktoren und relative Unsicherheiten zu verwenden, die als prozentuale Anteile angegeben werden (die Maßunsicherheit geteilt durch den Mittelwert der jeweiligen Komponente). Auf diese Weise sind die Empfindlichkeitsfaktoren für eine Funktion wie Gleichung (24) die Exponenten der jeweiligen Komponenten. Für den Fall, dass die Unsicherheitskomponenten als unabhängig und unkorreliert angenommen werden oder wenn die jeweiligen korrelierten Effekte vernachlässigbar sind, lautet eine praktische Arbeitsgleichung zur Berechnung der relativen kombinierten Standardunsicherheit durch RSS wie folgt:

$$u_c(q_m) = \sqrt{u_A^2(q_m) + u_B^2(C_d) + u_B^2(A^*) + u_B^2(C^*) + u_B^2(p_0) + \frac{1}{4}[u_B^2(M) + u_B^2(T_0)]} \quad (26)$$

wobei die Quadrate Varianzen sind.

Die relative Unsicherheit Typ A, $u_A(q_m)$, kann aus der Standardabweichung der verfügbaren Wiederholungsmessdaten berechnet werden. Die relativen Unsicherheiten Typ B in Gleichung (20) können aus der Unsicherheit jedes Faktors berechnet werden, wobei die absoluten Unsicherheiten jeder Komponente durch den Betrag dieser Komponente geteilt werden, um die relativen Unsicherheiten zu bestimmen. Dann werden die relativen Unsicherheiten quadriert und mithilfe der RSS-Beziehung kombiniert.

Jede der Unsicherheitskomponenten vom Typ B hat ihre eigene Untermenge an Unsicherheitsquellen. Folgende Unsicherheitskomponenten sollten betrachtet werden:

- Langzeit-Vergleichpräzision (Drift) des Durchflusskoeffizienten;
- Kalibrierung des Druckfühlers;

- c) Kalibrierung des Temperaturfühlers;
- d) Drift zwischen regelmäßigen Kalibrierungen;
- e) Temperatureinflüsse auf den Massendurchfluss der CFN, z. B. Wärmeableitung, Probenahmefehler;
- f) Wärmeausdehnung des Halsteils;
- g) Störeinflüsse zwischen den CFNs in einer Kammer;
- h) Sortenbeeinflussung (Kalibrierung in einem Gas, Anwendung in einem anderen Gas);
- i) Leckagen;
- j) Verschmutzung der CFN-Oberflächen;
- k) Druckeinflüsse, z. B. Fehler in C^* , weil Realgaseinflüsse nicht ordnungsgemäß erfasst wurden (siehe Anhang B).

Ein Beispiel für eine Teilkomponentenuntersuchung ist in Bild 7 dargestellt, die die Beziehung zwischen Durchmesserunsicherheiten (verschiedener Größenordnungen) und Querschnittsunsicherheiten zeigt.

12.3 Korrelierte Unsicherheitskomponenten

In einigen Messfällen sind die Komponenten nicht vollständig bzw. vorrangig unabhängig. Wenn eine Komponente in Abhängigkeit vom Wert einer anderen Komponente variiert, sind sie nicht unabhängig und die Korrelation der Variablen ist zu berücksichtigen.

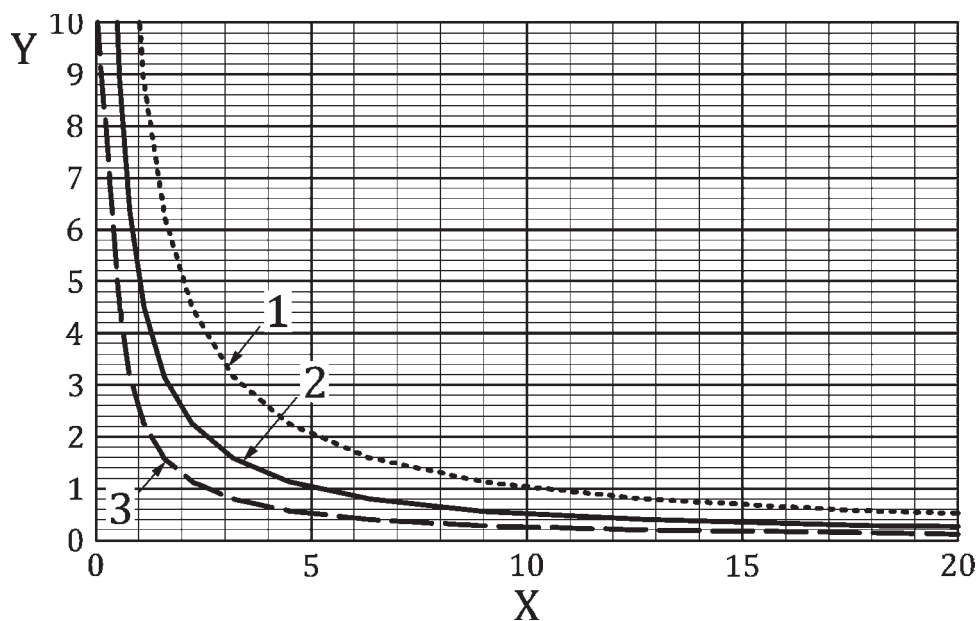
Für die Messfälle, bei denen die Ausdrücke in der Regelgleichung nicht als unabhängig angenommen werden können und der Grad der Korrelation signifikant ist, werden die Berechnungen etwas komplexer, da die jeweiligen relativen Korrelationen einbezogen werden sollten. Die Ausdrücke der korrelierten Variablen werden anhand der Daten für die jeweiligen interagierenden Ausdrücke berechnet oder ausgewertet.

Beispielsweise hängen sowohl C^* als auch M von der Gaszusammensetzung ab. Wenn diese Ausdrücke einbezogen werden, ergibt sich die folgende Gleichung für die kombinierte relative Unsicherheit:

$$u_c(q_m) = \sqrt{u_A^2(q_m) + u_B^2(C_d) + u_B^2(A^*) + u_B^2(C^*) + u_B^2(p_0) + \frac{1}{4}u_B^2(M) + \frac{1}{4}u_B^2(T_0) + \frac{1}{2}c_v(M, x_i)} \quad (27)$$

Dabei ist $c_v(M, x_i)$ die Kovarianz der Molekülmasse und der Gaszusammensetzung, wie mithilfe der Daten bewertet wurde, und wobei andere korrelierte Unsicherheiten weggelassen wurden, weil sie entweder null oder vernachlässigbar sind. Wenn z. B. die Abweichung des für die universelle Gaskonstante verwendeten Werts R so gering ist oder wenn bei der Kalibrierung und beim Einsatz der gleiche Wert von R verwendet wird, kann seine Unsicherheit vernachlässigt werden.

Für einige Gase können bei hohem Druck die normierten Empfindlichkeitsfaktoren für den Ruhedruck und die Ruhetemperatur aufgrund von Beiträgen der kritischen Strömungsfunktion von 1 abweichen. Zum Beispiel steigt für Erdgas bei Raumtemperatur und 9 MPa der Empfindlichkeitsfaktor für Druck von 1 auf 1,03 [51]. In solchen Fällen sollte der obere Wert verwendet werden, um den Effekt zu begrenzen.



Legende

- 1 Unsicherheit 0,050 mm in d_{nt}
- 2 Unsicherheit 0,025 mm in d_{nt}
- 3 Unsicherheit 0,013 mm in d_{nt}
- X d_{nt} in mm
- Y Unsicherheit in A_{nt} in %

Bild 7 — Prozentuale Unsicherheit des CFN-Halsquerschnitts aufgrund der Unsicherheit bei der Messung des Halsdurchmessers

In einem Raum verwendete CFNs haben auch eine signifikante korrelierte Unsicherheit in Bezug auf Druck, Temperatur und Kalibrierung.

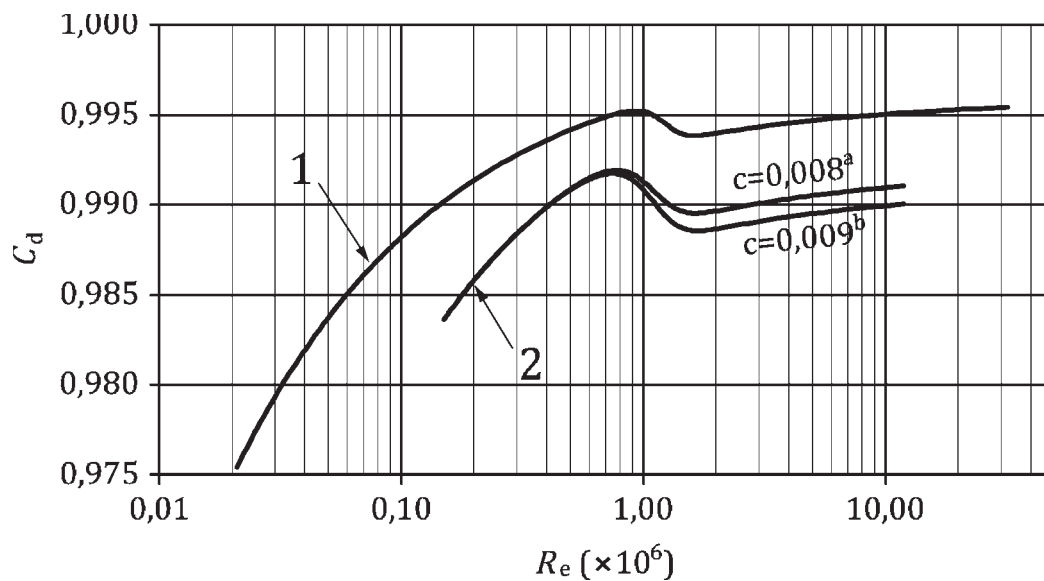
Anhang A (informativ)

Werte der Durchflusskoeffizienten

Für die Überprüfung durch Berechnung enthält Tabelle A.1 die Werte der Durchflusskoeffizienten für eine bestimmte Reihe von Reynolds-Zahlen, die mit Gleichung (17) und dem Koeffizienten von Tabelle 1 berechnet wurden. Die Kurven sind in Bild A.1 dargestellt.

Tabelle 2 — Durchflusskoeffizienten der CFNs

Toroidhals		Zylinderhals		
Reynolds-Zahl	Durchflusskoeffizient	Reynolds-Zahl	Durchflusskoeffizient (Luft)	Durchflusskoeffizient (Erdgas)
Re	C_d	Re	C_d	C_d
$2,1 \times 10^4$	0,975 4	$1,5 \times 10^5$	0,983 6	0,983 6
3×10^4	0,979 3	2×10^5	0,985 8	0,985 8
5×10^4	0,983 7	3×10^5	0,988 4	0,988 4
1×10^5	0,988 2	5×10^5	0,990 9	0,990 8
3×10^5	0,992 8	7×10^5	0,991 8	0,991 7
5×10^5	0,994 2	1×10^6	0,991 3	0,990 8
1×10^6	0,995 2	$1,3 \times 10^6$	0,989 9	0,989 1
$1,5 \times 10^6$	0,993 9	2×10^6	0,989 7	0,998 7
3×10^6	0,994 3	3×10^6	0,990 1	0,989 1
5×10^6	0,994 7	5×10^6	0,990 5	0,989 5
1×10^7	0,995 0	$1,2 \times 10^7$	0,991 0	0,990 0
$3,2 \times 10^7$	0,995 4			



Legende

- 1 CFN mit Toroidhals
- 2 CFN mit Zylinderhals
- ^a Erdgas
- ^b Luft

Bild A.1 — Kurven der Durchflusskoeffizienten

Anhang B (informativ)

Kritische Durchflussfunktion

B.1 Allgemeines

Der Massendurchfluss einer CFN wird zunächst durch den theoretischen Massendurchfluss angenähert und anschließend wird dessen Abweichung vom wahren Wert mithilfe des Durchflusskoeffizienten korrigiert. Da der theoretische Massendurchfluss durch das Produkt aus Fläche, lokaler Schallgeschwindigkeit und Dichte am kritischen Punkt definiert ist, sind es gerade Druck und Temperatur am kritischen Punkt, die sich direkt auf den Massendurchfluss auswirken.

Bei der Messung des Durchflusses mit einer CFN werden jedoch Druck und Temperatur in der Einlaufleitung gemessen, in der die Strömungsgeschwindigkeit sehr gering ist, und in die Werte bei Ruhebedingungen umgerechnet. Das bedeutet, dass die Gleichung des theoretischen Durchflusses einen Faktor enthält, der den Druck und die Temperatur im Ruhezustand in den Druck und die Temperatur im kritischen Punkt umrechnet, was die kritische Durchflussfunktion ergibt.

Die kritische Durchflussfunktion wird unter der Annahme einer eindimensionalen isentropen Strömung vom Ruhepunkt zu den kritischen Punkten berechnet und ist eine Funktion der Ruhebedingung und der Gaseigenschaften, d. h. des Realgasfaktors und des Isentropenexponenten.

B.2 Kritische Durchflussfunktion eines idealen Gases

Der Realgasfaktor eines idealen Gases ist unabhängig vom Zustand des Gases stets 1. Sein Isentropenexponent ist ebenfalls bei jedem Zustand des Gases konstant und entspricht dem Verhältnis der spezifischen Wärme. Unter diesen Bedingungen können die Strömungsgleichungen analytisch gelöst und die in 5.2 aufgeführten Grundgleichungen abgeleitet werden.

Der theoretische Durchfluss wird über die Werte am kritischen Punkt definiert, kann aber unter Verwendung der Grundgleichungen von 5.2 durch die Temperatur und den Druck am Ruhepunkt angegeben werden:

$$q_{thl} \equiv A^* \rho_p^* v_p^* = A^* \left[\frac{\sqrt{\gamma}}{\sqrt{\frac{R}{M}}} \right] \left[\frac{p_p^*}{\sqrt{T_p^*}} \right] = A^* \left[\frac{\sqrt{\gamma}}{\sqrt{\frac{R}{M}}} \right] \left[\sqrt{\left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \frac{p_0}{\sqrt{T_0}}} \right] = A^* C_p^* \frac{p_0}{\sqrt{\frac{R}{M} T_0}} \quad (B.1)$$

Der Faktor $\sqrt{\left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$ konvertiert $\frac{p_0}{\sqrt{T_0}}$ in $\frac{p_p^*}{\sqrt{T_p^*}}$. Unter Einbeziehung des verbleibenden Faktors $\sqrt{\gamma}$, der sich auf die Gaseigenschaften bezieht, ergibt sich die kritische Durchflussfunktion wie folgt:

$$C_p^* = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (B.2)$$

Liegt kein hoher Druck im Einlaufrohr vor, z.B. unter 1 MPa, darf C^* mit Gleichung (B.2) mit geringer Unsicherheit genähert werden. In diesem Fall wird empfohlen, den Wert von g im Ruhezustand aus einer Datenbank zu verwenden.

B.3 Kritische Durchflussfunktion eines realen Gases

Nach Gleichung (7) und Gleichung (8) sollten der Druck und die Temperatur am kritischen Punkt für $g = 1,4$ etwa 50 % bzw. 80 % der Ruhebedingungen betragen. Bei solch großen Variationen können der Isentropenexponent und der Realgasfaktor erheblich variieren, insbesondere wenn der Einfluss des realen Gases signifikant ist. Die kritische Durchflussfunktion des realen Gases berücksichtigt die Variationen des Realgasfaktors und des Isentropenfaktors, die während der Strömung vom Ruhepunkt zum kritischen Punkt auftreten sollten. In diesem Fall ist es nicht möglich, die Strömungsgleichungen analytisch zu lösen, weshalb numerische Berechnungen erforderlich sind.

Bei vorgegebenen Ruhebedingungen von p_0 und T_0 werden die Dichte und die lokale Schallgeschwindigkeit am kritischen Punkt, ρ^* und v^* , mithilfe einer Datenbank der thermodynamischen Eigenschaften berechnet, die Realgaseinflüsse berücksichtigt. Da die Strömung isentrop und adiabat ist, sind die Werte von Entropie und Enthalpie am kritischen Punkt gleich denen im Ruhezustand. Die Entropie am Halsteil und die Gesamtenthalpie sind unabhängige thermodynamische Größen und bestimmen daher den thermodynamischen Zustand am kritischen Punkt. Die kritische Durchflussfunktion des realen Gases C^* wird bestimmt, indem die eindeutige kritische Dichte und kritische Geschwindigkeit ermittelt werden, die dem thermodynamischen Zustand am kritischen Punkt entsprechen. In der Regel ist ein iteratives Verfahren erforderlich, um ρ^* und v^* aus der bekannten Entropie und Gesamtenthalpie zu bestimmen. Die kritische Durchflussfunktion wird wie folgt berechnet:

$$C^* = \frac{\rho^* v^*}{p_0} \sqrt{\frac{R}{M} T_0} \quad (\text{B.3})$$

Diese Berechnungen können einfach mithilfe der Thermodynamik-Datenbank REFPROP [42] durchgeführt werden, die vom National Institute of Standards and Technology (NIST) gepflegt und auf dem neuesten Stand gehalten wird. Sie löst intern das eindimensionale isentrope Strömungsmodell für die angegebenen Bedingungen der Gaszusammensetzung, des Ruhedrucks und der Ruhetemperatur. Außerdem enthält sie Unterprogramme, die in EXCEL, Fortran, C++, VBI, LabVIEW usw. eingebunden werden können. Sie dokumentiert die Unsicherheit experimentell gemessener Eigenschaften, enthält zahlreiche Gase (z. B. O_2 , CO_2 , N_2 , H_2 , Ar, C_2H_4 , He) und umfasst die Möglichkeit, benutzerdefinierte Gasgemische zu erstellen (z. B. Erdgas, trockene Luft und feuchte Luft).

B.4 Kritische Durchflussfunktion zur Verwendung bei Durchflussskalibrierung der CFN

B.4.1 Allgemeines

Es wird empfohlen, stets den genauen Wert für C^* zu verwenden, indem eine geeignete Datenbank zu Hilfe genommen wird; wenn die Strömung der CFN jedoch gegen einen Referenzstandard kalibriert werden soll, kann ein vereinfachtes Verfahren annehmbar sein, um den Wert von C^* wie in B.4.2 und B.4.3 einzustellen.

B.4.2 Verwendung im gleichen Gas bei gleichen Ruhebedingungen

Wenn die CFN im gleichen Gas bei gleichem Ruhedruck und gleicher Ruhetemperatur wie bei der Kalibrierung verwendet wird, braucht die kritische Durchflussfunktion nicht genau zu sein, z. B. kann eine Konstante annehmbar sein, und es muss derselbe Wert sowohl bei der Kalibrierung als auch bei der Anwendung verwendet werden. In diesem Fall wird die im gemessenen Durchflusskoeffizienten enthaltene Abweichung von C^* bei der Berechnung des Massendurchflusses in der Anwendung aufgehoben, genau wie die Abweichung im Halsdurchmesser.

B.4.3 Verwendung im gleichen Gas im gleichen Bereich der Ruhebedingungen

Wenn die CFN bei der Kalibrierung im gleichen Gas und im gleichen Bereich der Ruhebedingungen verwendet wird, indem die Reynolds-Zahl angepasst wird, dann braucht die Gleichung für C^* mit der geforderten Unsicherheit nicht genau zu sein, sondern sollte die Tendenz des wahren Werts von C^* mit einer angemessenen Genauigkeit wiedergeben, und die gleiche Gleichung muss sowohl bei der Kalibrierung als auch bei der Anwendung verwendet werden.

Wenn die Kombinationen von Druck und Temperatur bei der Anwendung fast die gleichen sind wie bei der Kalibrierung, kann eine konstante kritische Durchflussfunktion für den gesamten Bereich mit der gleichen Argumentation wie in B.4.2 annehmbar sein, und die gleiche Konstante muss bei der Anwendung verwendet werden.

B.4.4 Bei Notwendig von genauen Werten

Wenn die CFN in einem anderen Gas als bei der Kalibrierung verwendet wird, dann sollte C^* durch Anpassen der Reynolds-Zahlen in beiden Fällen genau sein. Wenn beispielsweise die Düse mit Luft kalibriert und in Sauerstoff verwendet wird, dann sollte C^* für Luft bei der Kalibrierung und C^* für Sauerstoff bei der Anwendung verwendet werden. Gleiches kann auch bei Verwendung desselben Gases erforderlich sein, wenn der Reynolds-Zahlenbereich bei der Anwendung über den der Kalibrierung hinaus extrapoliert wird, unter der Annahme, dass es bei der Anwendung keinen Grenzschichtübergang gibt.

B.5 Gase mit signifikantem Schwingungsrelaxationseffekt

Einige Gase wie SF_6 und CO_2 haben erhebliche Energiemengen in ihren Schwingungszuständen. Möglicherweise halten sie das thermische Gleichgewicht beim Durchströmen der Engstelle wegen der schnellen Temperatur- und Druckschwankungen in diesem Bereich nicht aufrecht; die in den Schwingungszuständen der Gasmoleküle gespeicherte innere Energie hat nicht genügend Zeit, um sich auf die Translations- und Rotationszustände der Moleküle umzuverteilen, und somit erreicht die kritische Durchflussfunktion nicht die Ruhezustandswerte, die die Datenbank der thermodynamischen Eigenschaften angibt. Die Istwerte für die kritische Durchflussfunktion werden teilweise bei dem Wert am Einlauf „eingefroren“, was zu einem größeren Wert als dem des Ruhezustands führt.

Folglich ist der Effekt bei kleineren CFNs aufgrund der kürzeren Durchflusszeit von der Eintrittsebene bis zum Halsteil stärker ausgeprägt. Wenn die CFN groß genug ist, kann die in REFPROP angegebene kritische Durchflussfunktion, d. h. Anhang B, keinen signifikanten Fehler verursachen; wenn jedoch z. B. eine CFN mit Toroidhals mit einem Halsdurchmesser von wenigen mm (typischerweise bei Reynolds-Zahlen unter 10^5) in CO_2 verwendet wird, darf der Massendurchfluss unter Verwendung der stationären kritischen Durchflussfunktion einen Fehler von mehr als 1 % aufweisen [56].

Anhang C (normativ)

Werte der kritischen Durchflussfunktion — Reingase und Luft

C.1 Allgemeines

Für zahlreiche Reingase und Luft darf die kritische Durchflussfunktion nach diesem Anhang für die festgelegten Druck- und Temperaturbereiche berechnet werden. Alle hier angegebenen Informationen wurden durch die in REFPROP 10.0 erzeugten Werte bestätigt.

Die kritische Durchflussfunktion darf wie folgt berechnet werden:

$$C^*(p,T) = \sum_j \left[\left(\sum_i C_{i,j} p^i \right) (T - T_{c^*})^{j C_{c^*}} \right] \quad (C.1)$$

und alle darin enthaltenen Koeffizienten sind in den Tabellen angegeben. p und T in den Gleichungen sind in MPa bzw. K angegeben.

Die Gleichungen besitzen ausschließlich in den festgelegten Bereichen Gültigkeit. Die geltenden Bereiche und Koeffizienten sind in Bild C.1 zusammengefasst.

ANMERKUNG Da die Gleichungen durch Anpassung abgeleitet wurden, können sie extrem große Fehler aufweisen, selbst wenn sie nur geringfügig außerhalb ihres gültigen Bereichs verwendet werden.

Gas	$T(K)$ $P(MPa)$	200 0,1	200 1	200 2	200 5	200 10	200 15	200 20	900	1 000	T_{c^*}	c_{c^*}	Tabelle/ Gleichung	Typische Abweichung von REFPROP
N_2	T Bereich	200				600					0	-1	Tabelle B.2	$\pm 0,01$ %
	P Bereich	0,1						20						
Ar	T Bereich	200				600					115	-1	Tabelle B.4	$\pm 0,02$ %
	P Bereich	0,1						20						
Trockene Luft + CO_2	T Bereich	200				600					65	-1	Tabelle B.6	$\pm 0,01$ %
	P Bereich	0,1						20						
Trockene Luft (ohne CO_2)	T Bereich	200				600					80	-1	Tabelle B.8	$\pm 0,01$ %
	P Bereich	0,1						20						
H-Korrektur für Luft	T Bereich	200	280								-	-	Gleichung B.1	$\pm 0,01$ %
	P Bereich	0,1	0,5											
CH_4	T Bereich	280				600					110	-1,7	Tabelle B.11	$\pm 0,005$ %
	P Bereich	0,1						20						
	T Bereich	200–225				600					90	-1,7	Tabelle B.12	$\pm 0,005$ %
	P Bereich	0,1				6,5								
	T Bereich	215–220				600					80	-1,8	Tabelle B.13	$\pm 0,05$ %
CO_2	P Bereich	0,1						20						
	T Bereich	265–365				370					175	-0,2	Tabelle B.15	$\pm 0,04$ %
	P Bereich	0,1						20						
	T Bereich	320				600					280	-0,9	Tabelle B.16	$\pm 0,01$ %
	P Bereich	0,1				10								
O_2	T Bereich	200				400					190	0,35	Tabelle B.17	$\pm 0,05$ %
	P Bereich	0,1						20						
	T Bereich	200				400					159	0,08	Tabelle B.18	$\pm 0,01$ %
	P Bereich	0,1				12								
Dampf	T Bereich				405			700			0	-1	Tabelle B.21	$\pm 0,05$ %
	P Bereich	0,1				6								
	T Bereich					645			1000		583	-0,5	Tabelle B.22	$\pm 0,004$ %
	P Bereich	0,1						17						

Bild C.1 — Gültige Bereiche, Koeffizienten und typische Fehler

C.2 Stickstoff

Die mit REFPROP erzeugten Werte für die kritische Durchflussfunktion sind in Tabelle C.1 angegeben. Die Koeffizienten für Gleichung (C.1), deren Gültigkeitsbereiche und Abweichungen von den REFPROP-Werten sind in Tabelle C.2 angegeben.

Tabelle 3 — C^* -Werte (Stickstoff)

T K	p MPa										
	0,1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
200	0,685 61	0,703 67	0,724 97	0,748 45	0,773 43	0,798 56	0,822 04	0,842 30	0,858 42	0,870 23	0,878 09
220	0,685 38	0,698 67	0,713 60	0,729 28	0,745 30	0,761 09	0,775 99	0,789 38	0,800 81	0,810 06	0,817 10
240	0,685 22	0,695 21	0,706 08	0,717 14	0,728 16	0,738 84	0,748 89	0,758 03	0,766 04	0,772 80	0,778 25
260	0,685 10	0,692 72	0,700 83	0,708 90	0,716 79	0,724 34	0,731 40	0,737 82	0,743 52	0,748 40	0,752 44
280	0,685 00	0,690 88	0,697 02	0,703 03	0,708 82	0,714 30	0,719 38	0,723 99	0,728 08	0,731 60	0,734 55
300	0,684 92	0,689 48	0,694 17	0,698 70	0,703 00	0,707 03	0,710 74	0,714 08	0,717 03	0,719 56	0,721 68
320	0,684 85	0,688 39	0,691 98	0,695 40	0,698 62	0,701 60	0,704 31	0,706 73	0,708 85	0,710 65	0,712 13
340	0,684 78	0,687 52	0,690 26	0,692 85	0,695 24	0,697 44	0,699 41	0,701 14	0,702 63	0,703 87	0,704 86
360	0,684 70	0,686 81	0,688 89	0,690 82	0,692 58	0,694 17	0,695 58	0,696 79	0,697 80	0,698 61	0,699 22
380	0,684 62	0,686 21	0,687 76	0,689 18	0,690 45	0,691 57	0,692 53	0,693 33	0,693 97	0,694 44	0,694 75
400	0,684 52	0,685 70	0,686 82	0,687 83	0,688 71	0,689 45	0,690 07	0,690 54	0,690 88	0,691 09	0,691 16
420	0,684 41	0,685 25	0,686 03	0,686 70	0,687 26	0,687 71	0,688 04	0,688 26	0,688 36	0,688 35	0,688 24
440	0,684 28	0,684 84	0,685 33	0,685 73	0,686 04	0,686 24	0,686 35	0,686 36	0,686 27	0,686 09	0,685 82
460	0,684 13	0,684 45	0,684 71	0,684 89	0,684 98	0,684 99	0,684 91	0,684 75	0,684 51	0,684 19	0,683 79
480	0,683 95	0,684 09	0,684 15	0,684 15	0,684 07	0,683 91	0,683 68	0,683 38	0,683 01	0,682 58	0,682 07
500	0,683 76	0,683 73	0,683 64	0,683 48	0,683 25	0,682 96	0,682 61	0,682 20	0,681 72	0,681 19	0,680 60
520	0,683 55	0,683 38	0,683 15	0,682 86	0,682 52	0,682 12	0,681 66	0,681 15	0,680 59	0,679 98	0,679 32
540	0,683 31	0,683 03	0,682 69	0,682 29	0,681 85	0,681 35	0,680 81	0,680 22	0,679 59	0,678 92	0,678 20
560	0,683 05	0,682 68	0,682 24	0,681 75	0,681 22	0,680 65	0,680 04	0,679 39	0,678 70	0,677 97	0,677 21
580	0,682 78	0,682 32	0,681 80	0,681 24	0,680 64	0,680 01	0,679 34	0,678 63	0,677 89	0,677 12	0,676 32
600	0,682 49	0,681 96	0,681 38	0,680 75	0,680 10	0,679 41	0,678 68	0,677 93	0,677 15	0,676 35	0,675 51

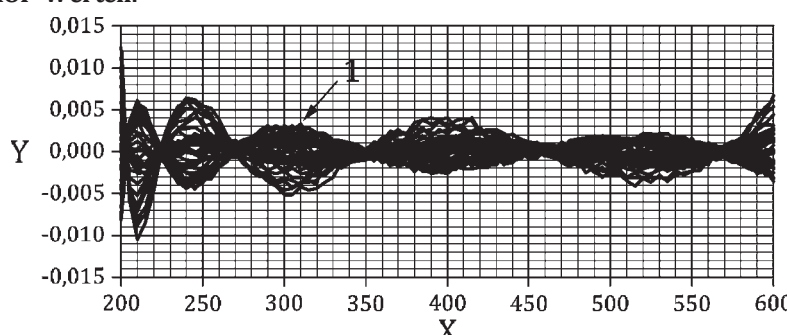
Tabelle 4 — Koeffizienten C_{ij} , Bereich und Abweichung (Stickstoff)

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6,4336956611E-01	4,7296075417E-04	-3,1255179342E-04	1,3396520309E-04	-3,7947907551E-05	3,9457168053E-06	-1,6815560580E-07	2,5531295021E-09
1	5,5722795643E+01	-1,6425128809E+00	5,7494305947E-01	-2,4722449878E-01	7,1051054066E-02	-7,4099892011E-03	3,1578338858E-04	-4,7904838514E-06
2	-3,0103757798E+04	8,6154554821E+02	-4,1239609107E+02	1,7829792294E+02	-5,1993401698E+01	5,4371374898E+00	-2,3162411346E-01	3,5098403510E-03
3	8,1121905812E+06	-1,2040217408E+05	1,4372487414E+05	-6,2650887706E+04	1,8574652141E+04	-1,9481382327E+03	8,2944808490E+01	-1,2551494934E+00
4	-1,0870921669E+09	2,3685376561E+07	-2,5489135858E+07	1,0717829268E+07	-3,2399768190E+06	3,4110952631E+05	-1,4514496899E+04	2,1928231749E+02
5	5,7841908463E+10	-1,4966843067E+09	1,9300691782E+09	-7,1627042759E+08	2,2082797549E+08	-2,3379084559E+07	9,9446430087E+05	-1,4996991208E+04

Parameter
 $T_{c^*} = 0$
 $C_{c^*} = -1$

Bereich:
 $0,1 \text{ MPa} \leq p \leq 20 \text{ MPa}$
 $200 \text{ K} \leq T \leq 600 \text{ K}$

Abweichung von den REFPROP-Werten:



Legende
1 $p = 0,1 \text{ MPa}$ und $0,5 \text{ MPa} \sim 20 \text{ MPa}$ mit $0,5 \text{ MPa}$ -Schritt, und $T = 200 \text{ K} \sim 600 \text{ K}$ mit 5 K -Schritt
X Temperatur, in Kelvin
Y Abweichung, in %

C.3 Argon

Die mit REFPROP erzeugten Werte für die kritische Durchflussfunktion sind in Tabelle C.3 angegeben. Die Koeffizienten für Gleichung (C.1), deren Gültigkeitsbereiche und Abweichungen von den REFPROP-Werten sind in Tabelle C.4 angegeben.

Tabelle C.3 — C^* -Werte (Argon)

T K	p MPa										
	0,1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
220	0,727 19	0,747 57	0,771 78	0,799 09	0,829 52	0,862 52	0,896 81	0,930 34	0,960 91	0,986 85	1,007 40
240	0,726 98	0,742 74	0,760 74	0,780 17	0,800 86	0,822 48	0,844 48	0,866 12	0,886 59	0,905 16	0,921 29
260	0,726 82	0,739 26	0,753 08	0,767 56	0,782 57	0,797 88	0,813 21	0,828 21	0,842 54	0,855 84	0,867 84
280	0,726 70	0,736 66	0,747 51	0,758 66	0,769 98	0,781 36	0,792 61	0,803 56	0,814 02	0,823 82	0,832 82
300	0,726 60	0,734 68	0,743 35	0,752 11	0,760 90	0,769 61	0,778 16	0,786 43	0,794 32	0,801 74	0,808 60
320	0,726 53	0,733 14	0,740 14	0,747 15	0,754 09	0,760 92	0,767 57	0,773 97	0,780 06	0,785 79	0,791 11
340	0,726 47	0,731 92	0,737 63	0,743 29	0,748 86	0,754 30	0,759 55	0,764 59	0,769 37	0,773 87	0,778 04
360	0,726 42	0,730 93	0,735 63	0,740 25	0,744 75	0,749 12	0,753 33	0,757 34	0,761 14	0,764 70	0,768 01
380	0,726 38	0,730 13	0,734 01	0,737 80	0,741 47	0,745 01	0,748 40	0,751 63	0,754 66	0,757 50	0,760 14
400	0,726 35	0,729 48	0,732 69	0,735 81	0,738 81	0,741 70	0,744 44	0,747 04	0,749 48	0,751 75	0,753 85
420	0,726 32	0,728 93	0,731 60	0,734 16	0,736 63	0,738 98	0,741 21	0,743 31	0,745 27	0,747 09	0,748 76
440	0,726 30	0,728 47	0,730 68	0,732 80	0,734 82	0,736 74	0,738 55	0,740 24	0,741 81	0,743 26	0,744 58
460	0,726 28	0,728 09	0,729 92	0,731 66	0,733 31	0,734 87	0,736 33	0,737 69	0,738 94	0,740 08	0,741 12
480	0,726 27	0,727 76	0,729 27	0,730 70	0,732 04	0,733 30	0,734 47	0,735 55	0,736 53	0,737 43	0,738 23
500	0,726 25	0,727 49	0,728 72	0,729 88	0,730 96	0,731 97	0,732 89	0,733 74	0,734 50	0,735 19	0,735 79
520	0,726 24	0,727 25	0,728 25	0,729 18	0,730 04	0,730 83	0,731 55	0,732 20	0,732 78	0,733 28	0,733 72
540	0,726 23	0,727 04	0,727 84	0,728 58	0,729 25	0,729 86	0,730 41	0,730 89	0,731 31	0,731 66	0,731 95
560	0,726 22	0,726 86	0,727 49	0,728 06	0,728 57	0,729 02	0,729 42	0,729 76	0,730 04	0,730 27	0,730 43
580	0,726 21	0,726 71	0,727 19	0,727 61	0,727 98	0,728 30	0,728 57	0,728 79	0,728 95	0,729 06	0,729 13
600	0,726 21	0,726 58	0,726 92	0,727 22	0,727 47	0,727 67	0,727 83	0,727 94	0,728 01	0,728 02	0,728 00

Tabelle C.4 — Koeffizienten C_{ij} , Bereich und Abweichung (Argon)

j	0	1	2	3	4	5	6	7
i								
0	7,2610816711E-01	2,0424744322E-04	-3,7092312499E-04	1,3687238653E-04	-2,3973242951E-05	2,0659548164E-06	-8,3931930834E-08	1,2826659773E-09
1	9,5672154802E-02	-1,0230261725E+00	4,5634919313E-01	-1,6391501575E-01	2,8409912783E-02	-2,4298910705E-03	9,8118114723E-05	-1,4918861511E-06
2	-4,4593117589E+01	6,6306210002E+02	-2,1169065668E+02	7,3462525914E+01	-1,2581351891E+01	1,0667011110E+00	-4,2757451483E-02	6,4604035260E-04
3	9,7212599444E+03	-9,4464216761E+04	4,5060321558E+04	-1,5465893550E+04	2,6143562248E+03	-2,1935251047E+02	8,7124877730E+00	-1,3058854448E-01
4	-1,0001200725E+06	7,2076805986E+06	-4,4111153756E+06	1,5374982308E+06	-2,5706364919E+05	2,1303600624E+04	-8,3636030821E+02	1,2405359587E+01
5	3,9310652455E+07	-2,3502673621E+08	1,6632741713E+08	-5,8241481484E+07	9,6703642131E+06	-7,9081523127E+05	3,0582999205E+04	-4,4723356837E+02

Parameter: $T_{c*} = 0$
 $C_{c*} = -1$

Bereich:
 $0,1 \text{ MPa} \leq p \leq 20 \text{ MPa}$
 $200 \text{ K} \leq T \leq 600 \text{ K}$

Abweichung von den REFPROP-Werten:

Legende

1 $p = 0,1 \text{ MPa}$ und $0,5 \text{ MPa} \sim 20 \text{ MPa}$ mit $0,5 \text{ MPa}$ -Schritt, und $T = 200 \text{ K} \sim 600 \text{ K}$ mit 5 K -Schritt

X Temperatur, in Kelvin

Y Abweichung, in %