

## DIN EN ISO 9300



ICS 17.120.10

Ersatz für  
DIN EN ISO 9300:2005-11**Durchflussmessung von Gasen mit Venturidüsen bei kritischer Strömung  
(ISO 9300:2022);  
Deutsche Fassung EN ISO 9300:2022**Measurement of gas flow by means of critical flow nozzles (ISO 9300:2022);  
German version EN ISO 9300:2022Mesurage de débit de gaz au moyen de tuyères en régime critique (ISO 9300:2022);  
Version allemande EN ISO 9300:2022

Gesamtumfang 133 Seiten

DIN-Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG)

## Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 9300:2022) 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).

In DIN EN ISO 80000-2 sind mathematische Zeichen für die Angabe von Intervallen enthalten. In dem vorliegenden Dokument wird davon abweichend das Zeichen "~" verwendet, also z. B. die Schreibweise 0,5 MPa ~ 20 MPa für das abgeschlossene Intervall von 0,5 MPa bis 20 MPa.

Die in diesem Dokument verwendete Bezeichnung „Luftzusammensetzung nach CIPM-2007“ bezieht sich auf die vom Internationalen Komitee für Maß und Gewicht (CIPM, fr: Comité International des Poids et Mesures) auf dessen 96. Sitzung im November 2007 verabschiedete Formel für die Dichte von Luft (siehe den entsprechenden Literaturhinweis im Nationalen Anhang NA).

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

|                  |       |                             |
|------------------|-------|-----------------------------|
| ISO 5167-1       | siehe | DIN EN ISO 5167-1           |
| 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](http://www.din.de)) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

## Änderungen

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

- die Kurve für den Durchflusskoeffizienten wird jeweils durch eine einzige Gleichung für die Venturidüsen bei kritischer Strömung (CFNs) mit Toroid- und Zylinderhals angegeben, die sowohl das laminare als auch das turbulente Grenzschichtregime abdeckt;
- die Kurve für den Durchflusskoeffizienten von CFNs mit Toroidhals wurde auf der Grundlage der jüngsten experimentellen und theoretischen Daten aktualisiert;
- CFNs ohne Diffusor (en: quadrant CFN) und mit abnehmbarem Diffusor werden berücksichtigt;
- die Grundgleichungen zur Messung des Durchflusskoeffizienten werden aufgeführt;
- das Phänomen der vorzeitigen Entdrosselung (en: premature unchoking phenomenon) wird erklärt, um auf die unvorhersehbare Entdrosselung bei niedrigen Reynolds-Zahlen aufmerksam zu machen;

- f) die *Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database* (REFPROP) wird für die Berechnung des Beiwerts der kritischen Strömung und der Viskosität eingeführt und es werden entsprechend angepasste Kurven für einige Reingase und Luft angegeben;
- g) das Verfahren zur Korrektur des Durchmessers (DCM, en: diameter correction method) zur Anpassung der experimentellen Daten für den Durchflusskoeffizienten an eine Referenzkurve wird eingeführt und detailliert beschrieben;
- h) ein detailliertes Verfahren zur Anpassung der Kurve für den Durchflusskoeffizienten an einen experimentellen Datensatz wird beschrieben;
- i) Hintergrundinformationen zu den Anforderungen werden angegeben;
- j) Die Übersetzung von Fachbegriffen ist an den aktuellen Gebrauch in der deutschen Fachsprache angepasst worden. Insbesondere sind die folgenden Übersetzungen geändert worden: *critical flow function* (bisher: kritische Durchflussfunktion, jetzt: Beiwert der kritischen Strömung), *stagnation conditions* (bisher: Ruhebedingungen, jetzt: absolute Bedingungen), *stagnation pressure* (bisher: Ruhedruck, jetzt: absoluter Gesamtdruck). Sofern es sich um in Abschnitt 3 definierte Begriffe handelt, ist die bisherige Benennung als zulässige Nebenbenennung erhalten worden.

#### Frühere Ausgaben

DIN EN ISO 9300: 1995-04, 2005-11

## Nationaler Anhang NA (informativ)

### Literaturhinweise

DIN EN ISO 5167-1, *Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt — Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*

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*

DIN EN ISO 80000-1, *Größen und Einheiten — Teil 1: Allgemeines*

DIN EN ISO 80000-2, *Größen und Einheiten — Teil 2: Mathematik*

PICARD, A., DAVIS, R. S., GLÄSER, M. and FUJII, K., *Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)*, Metrologica 45 (2), 149, 2008

Deutsche Fassung

## Durchflussmessung von Gasen mit Venturidüsen bei kritischer Strömung (ISO 9300:2022)

Measurement of gas flow by means of critical flow nozzles  
(ISO 9300:2022)

Mesurage de débit de gaz au moyen de tuyères en régime critique (ISO 9300:2022)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 17. Juni 2022 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC-Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG  
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION  
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

Inhalt

|                                                                 | Seite |
|-----------------------------------------------------------------|-------|
| Europäisches Vorwort.....                                       | 4     |
| Vorwort.....                                                    | 5     |
| 1 Anwendungsbereich.....                                        | 7     |
| 2 Normative Verweisungen.....                                   | 7     |
| 3 Begriffe.....                                                 | 7     |
| 4 Symbole und Abkürzungen.....                                  | 13    |
| 5 Grundgleichungen.....                                         | 17    |
| 5.1 Gasverhalten.....                                           | 17    |
| 5.1.1 Isentroper Prozess.....                                   | 17    |
| 5.1.2 Zustandsgleichung.....                                    | 17    |
| 5.2 Isentrope Strömung eines idealen Gases.....                 | 17    |
| 5.2.1 Strömungsquerschnitt.....                                 | 17    |
| 5.2.2 Statischer Druck.....                                     | 17    |
| 5.2.3 Statische Temperatur.....                                 | 17    |
| 5.3 Theoretische Variablen am kritischen Punkt.....             | 17    |
| 5.3.1 Allgemeines.....                                          | 17    |
| 5.3.2 Kritischer Druck.....                                     | 18    |
| 5.3.3 Kritische Temperatur.....                                 | 18    |
| 5.3.4 Kritische Dichte.....                                     | 18    |
| 5.3.5 Kritische Geschwindigkeit.....                            | 18    |
| 5.4 Theoretischer Massendurchfluss.....                         | 18    |
| 5.4.1 Allgemeines.....                                          | 18    |
| 5.4.2 Theoretischer Massendurchfluss eines idealen Gases.....   | 18    |
| 5.4.3 Theoretischer Massendurchfluss eines realen Gases.....    | 19    |
| 5.5 Massendurchfluss.....                                       | 19    |
| 6 Allgemeine Anforderungen.....                                 | 19    |
| 7 Anwendungen, für die das Messverfahren geeignet ist.....      | 20    |
| 8 CFNs.....                                                     | 20    |
| 8.1 Allgemeine Anforderungen an beide CFN-Normausführungen..... | 20    |
| 8.1.1 Allgemeines.....                                          | 20    |
| 8.1.2 Werkstoffe.....                                           | 21    |
| 8.1.3 Engstelle und Halsteil.....                               | 21    |
| 8.1.4 Diffusor.....                                             | 21    |
| 8.2 Anforderungen an die CFN-Normausführungen.....              | 22    |
| 8.2.1 CFN mit Toroidhals.....                                   | 22    |
| 8.2.2 CFN mit Toroidhals.....                                   | 22    |
| 8.2.3 CFN mit Zylinderhals.....                                 | 23    |
| 9 Einbauanforderungen.....                                      | 25    |
| 9.1 Allgemeine Anforderungen an beide Normkonfigurationen.....  | 25    |
| 9.1.1 Normkonfigurationen.....                                  | 25    |
| 9.1.2 Druckentnahme im Einlaufrohr.....                         | 25    |
| 9.1.3 Druckentnahme am Auslaufrohr.....                         | 26    |
| 9.1.4 Messung der Temperatur.....                               | 26    |

|                         |                                                                                                                                           |     |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1.5                   | Messung der Dichte .....                                                                                                                  | 27  |
| 9.1.6                   | Entleerungsbohrung .....                                                                                                                  | 27  |
| 9.1.7                   | Bedingungen im Nachlaufrohr .....                                                                                                         | 27  |
| 9.2                     | Rohrkonfiguration .....                                                                                                                   | 27  |
| 9.2.1                   | Allgemeines .....                                                                                                                         | 27  |
| 9.2.2                   | Einlaufrohr .....                                                                                                                         | 27  |
| 9.2.3                   | Messung des Drucks .....                                                                                                                  | 29  |
| 9.2.4                   | Messung der Temperatur .....                                                                                                              | 29  |
| 9.3                     | Kammerkonfiguration .....                                                                                                                 | 29  |
| 9.3.1                   | Allgemeines .....                                                                                                                         | 29  |
| 9.3.2                   | Einlaufkammer .....                                                                                                                       | 29  |
| 9.3.3                   | Messung des Drucks .....                                                                                                                  | 29  |
| 9.3.4                   | Messung der Temperatur .....                                                                                                              | 29  |
| 9.3.5                   | Ausgangsdruckverhältnis .....                                                                                                             | 30  |
| 10                      | Berechnungen .....                                                                                                                        | 30  |
| 10.1                    | Allgemeines .....                                                                                                                         | 30  |
| 10.2                    | Berechnung des Massendurchflusses $q_m$ .....                                                                                             | 30  |
| 10.3                    | Berechnung des Durchflusskoeffizienten $C_d$ .....                                                                                        | 30  |
| 10.4                    | Berechnung des Beiwerts der kritischen Strömung $C^*$ oder $CD^*$ .....                                                                   | 31  |
| 10.5                    | Umrechnung des gemessenen Drucks in absoluten Gesamtdruck .....                                                                           | 32  |
| 10.6                    | Umrechnung der gemessenen Temperatur in Ruhetemperatur .....                                                                              | 32  |
| 10.7                    | Berechnung der Viskosität .....                                                                                                           | 32  |
| 11                      | Abschätzung des kritischen Ausgangsdruckverhältnisses .....                                                                               | 33  |
| 11.1                    | Für einen herkömmlichen Diffusor bei Reynolds-Zahlen oberhalb von $2 \cdot 10^5$ .....                                                    | 33  |
| 11.2                    | Für alle Diffusoren bei niedrigen Reynolds-Zahlen .....                                                                                   | 34  |
| 11.3                    | Für CFNs ohne Diffusor oder mit sehr kurzem Diffusor .....                                                                                | 34  |
| 12                      | Unsicherheiten bei der Durchflussmessung .....                                                                                            | 34  |
| 12.1                    | Allgemeines .....                                                                                                                         | 34  |
| 12.2                    | Praktische Berechnung der Messunsicherheit .....                                                                                          | 35  |
| 12.3                    | Korrelierte Beiträge der Messunsicherheit .....                                                                                           | 36  |
| Anhang A (informativ)   | Zahlenwerte für den Durchflusskoeffizienten .....                                                                                         | 38  |
| Anhang B (informativ)   | Beiwert der kritischen Strömung .....                                                                                                     | 40  |
| Anhang C (informativ)   | Werte des Beiwerts der kritischen Strömung — Reingase und Luft .....                                                                      | 43  |
| Anhang D (informativ)   | Berechnung des kritischen Massenstroms für CFNs mit großem<br>Durchmesser Verhältnis von Halsteil zu Einlaufrohr ( $\beta > 0,25$ ) ..... | 66  |
| Anhang E (informativ)   | Verfahren zur Korrektur des Durchmessers .....                                                                                            | 70  |
| Anhang F (informativ)   | Anpassung der Durchflusskoeffizienten-Kurve an einen Datensatz .....                                                                      | 75  |
| Anhang G (informativ)   | Durchflusskoeffizient .....                                                                                                               | 83  |
| Anhang H (informativ)   | Kritisches Ausgangsdruckverhältnis .....                                                                                                  | 89  |
| Anhang I (informativ)   | Werte für die Viskosität — Reingase und Luft .....                                                                                        | 98  |
| Anhang J (informativ)   | Ergänzungen .....                                                                                                                         | 114 |
| Literaturhinweise ..... |                                                                                                                                           | 123 |

## **Europäisches Vorwort**

Dieses Dokument (EN ISO 9300:2022) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 30 „Measurement of fluid flow in closed conduits“ in Zusammenarbeit mit dem CCMC erarbeitet.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Dezember 2022, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Dezember 2022 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt EN ISO 9300:2005.

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.

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die Republik Nordmazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

### **Anerkennungsnotiz**

Der Text von ISO 9300:2022 wurde von CEN als EN ISO 9300:2022 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

## 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](http://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](http://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](http://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*, in Zusammenarbeit mit dem Europäischen Komitee für Normung (CEN), Technisches Komitee CEN/SS F05, *Measuring instruments*, in Übereinstimmung mit der Vereinbarung zur technischen Zusammenarbeit zwischen ISO und CEN (Wiener Vereinbarung) erarbeitet.

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

Die wesentlichen Änderungen sind folgende:

- die Kurve für den Durchflusskoeffizienten wird jeweils durch eine einzige Gleichung für die Venturidüsen bei kritischer Strömung (CFNs) mit Toroid- und Zylinderhals angegeben, die sowohl das laminare als auch das turbulente Grenzschichtregime abdeckt;
- die Kurve für den Durchflusskoeffizienten von CFNs mit Toroidhals wurde auf der Grundlage der jüngsten experimentellen und theoretischen Daten aktualisiert;
- CFNs ohne Diffusor (en: quadrant CFN) und mit abnehmbarem Diffusor werden berücksichtigt;
- die Grundgleichungen zur Messung des Durchflusskoeffizienten werden aufgeführt;
- das Phänomen der vorzeitigen Entdrosselung (en: premature unchoking phenomenon) wird erklärt, um auf die unvorhersehbare Entdrosselung bei niedrigen Reynolds-Zahlen aufmerksam zu machen;
- die *Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database* (REFPROP) wird für die Berechnung des Beiwerts der kritischen Strömung und der Viskosität eingeführt und es werden entsprechend angepasste Kurven für einige Reingase und Luft angegeben;

- das Verfahren zur Korrektur des Durchmessers (DCM, en: diameter correction method) zur Anpassung der experimentellen Daten für den Durchflusskoeffizienten an eine Referenzkurve wird eingeführt und detailliert beschrieben;
- ein detailliertes Verfahren zur Anpassung der Kurve für den Durchflusskoeffizienten an einen experimentellen Datensatz wird beschrieben;
- Hintergrundinformationen zu den Anforderungen werden angegeben.

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](http://www.iso.org/members.html) zu finden.

## 1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die geometrischen Formen und Maße sowie die Anwendung (Einbau in ein System und Betriebsbedingungen) von Düsen bei kritischer Strömung (CFNs, en: critical flow nozzles) fest, die zur Bestimmung des Massendurchflusses eines durch ein System strömenden Gases verwendet werden, ohne dass hierzu die CFN grundsätzlich kalibriert werden muss. Es enthält außerdem die erforderlichen Angaben für die Berechnung des Durchflusses und der zugehörigen Messunsicherheit.

Dieses Dokument ist anwendbar für Düsen, in denen das Gas im kleinsten Strömungsquerschnitt auf die kritische Strömungsgeschwindigkeit beschleunigt wird, ausschließlich für den Fall einer stationären Strömung eines einphasigen Gases. 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. bezüglich des Verhältnisses des Durchmessers des Halsteils der CFN zum Durchmesser des Einlaufrohrs und der Reynolds-Zahl. Dieses Dokument behandelt CFNs mit Toroid- und Zylinderhals, für die eine ausreichende Anzahl an direkten Kalibrierungen durchgeführt wurde, sodass die sich daraus ergebenden Kalibrierkoeffizienten innerhalb bestimmter Grenzen der Messunsicherheit angewendet werden können.

## 2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

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 strömenden Gases (siehe Anhang J)

Anmerkung 1 zum Begriff: Der statische Druck wird durch *Wand-Druckentnahmen* (3.1.3) gemessen.

#### 3.1.2

##### **absoluter Gesamtdruck**

Ruhedruck

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

#### 3.1.3

##### **Wand-Druckentnahme**

in die Wand einer Rohrleitung gebohrtes Loch, um den *statischen Druck* (3.1.1) des in der Leitung strömenden Gases zu messen

## 3.2 Temperatur

### 3.2.1

#### **statische Temperatur**

Temperatur des Gasstroms (siehe Anhang J)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die statische Temperatur kann durch einen in der Rohrleitung befestigten Temperaturfühler nicht genau gemessen werden.

### 3.2.2

#### **Ruhetemperatur**

Temperatur, die in einem strömenden Gas entstehen würde, wenn die Geschwindigkeit isentrop auf null verringert wird (siehe Anhang J)

### 3.2.3

#### **Rückgewinnungstemperatur**

gemessene Temperatur

Wandtemperatur

Temperatur des Gases, das die Rohrwand berührt (siehe Anhang J)

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein an einer Rohrleitung befestigter Temperaturfühler misst diese Temperatur.

## 3.3 Düse

### 3.3.1

#### **Engstelle**

#### **Einlaufteil**

Teil der *Düse* (3.3.5) vor dem *Halsteil* (3.3.2) zur Beschleunigung des Durchflusses und zum Erreichen des vorgesehenen Strömungsfelds am *kritischen Punkt* (3.4.4)

### 3.3.2

#### **Halsteil**

Teil der *Düse* (3.3.5) mit dem geringsten Querschnitt

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieses Dokument behandelt Düsen mit Toroid- und Zylinderhals.

### 3.3.3

#### **Diffusor**

#### **Expansionsteil**

auseinanderlaufender Teil der *Düse* (3.3.5) hinter dem *Halsteil* (3.3.2) zur Druckerholung

### 3.3.4

#### **herkömmlicher Diffusor**

Kegelstumpfdiffusor (3.3.3), 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* (3.3.1) und *Halsteil* (3.3.2) bzw. *Engstelle* (3.3.1), *Halsteil* (3.3.2) und *Diffusor* (3.3.3) besteht

### 3.3.6

#### **Düse bei kritischer Strömung**

**CFN**, en: critical flow nozzle

kritische Düse

gedrosselte Düse

*Düse* (3.3.5), in der die *kritische Strömung* (3.4.2) erreicht wird

### 3.3.7

#### **üblich bearbeitete Düse**

**NPN**, en: normal precision nozzle

auf einer Drehmaschine bearbeitete *Düse* (3.3.5), deren gewünschte Rauigkeit durch Polieren der Oberfläche erzielt wird

### 3.3.8

#### **hochgenau bearbeitete Düse**

**HPN**, en: high precision nozzle

auf einer Drehmaschine bearbeitete *Düse* (3.3.5), bei der die Eigenschaft „Hochglanz“ ohne Polieren der Oberfläche erzielt werden kann, sodass ihre geometrischen Maße genau der Auslegung entsprechen

## 3.4 Strömung

### 3.4.1

#### **isentropische Strömung**

theoretische Strömung, entlang derer ein thermodynamische Prozess adiabat und reversibel verläuft (siehe Anhang J)

### 3.4.2

#### **kritische Strömung**

Strömung durch eine *Düse* (3.3.5), bei der sich der maximale Durchfluss der *Düse* (3.3.5) für einen gegebenen Satz von Einlaufbedingungen eingestellt hat (siehe Anhang J)

### 3.4.3

#### **drosseln**

#### **gedrosselt sein**

Erreichen der *kritischen Strömung* (3.4.2) in einer *Düse* (3.3.5) (siehe Anhang J)

### 3.4.4

#### **kritischer Punkt**

Ort in der *CFN* (3.3.6), an dem die Strömung die *kritische Geschwindigkeit* (3.4.11) erreicht

### 3.4.5

#### **kritischer Druck**

$p^*$

*statischer Druck* (3.1.1.) am *kritischen Punkt* (3.4.4) (siehe Anhang J)

### 3.4.6

#### **kritischer Druck eines idealen Gases**

$p_p^*$

theoretischer *statischer Druck* (3.1.1) am *kritischen Punkt* (3.4.4) unter der Annahme einer *isentropen Strömung* (3.4.1) eines *idealen Gases* (3.6.1)

### 3.4.7

#### **kritische Temperatur**

$T^*$

*statische Temperatur* (3.2.1) am *kritischen Punkt* (3.4.4)

### 3.4.8

#### kritische Temperatur eines idealen Gases

$T_p^*$   
theoretische *statische Temperatur* (3.2.1) am *kritischen Punkt* (3.4.4) unter der Annahme einer *isentropen Strömung* (3.4.1) eines *idealen Gases* (3.6.1)

### 3.4.9

#### kritische Dichte

$\rho^*$   
Dichte am *kritischen Punkt* (3.4.4)

### 3.4.10

#### kritische Dichte eines idealen Gases

$\rho_p^*$   
theoretische Dichte am *kritischen Punkt* (3.4.4) unter der Annahme einer *isentropen Strömung* (3.4.1) eines *idealen Gases* (3.6.1)

### 3.4.11

#### kritische Geschwindigkeit

$c^*$   
Strömungsgeschwindigkeit am *kritischen Punkt* (3.4.4) (siehe Anhang J)

### 3.4.12

#### kritische Geschwindigkeit eines idealen Gases

$c_p^*$   
theoretische Strömungsgeschwindigkeit am *kritischen Punkt* (3.4.4) unter der Annahme einer *isentropen Strömung* (3.4.1) eines *idealen Gases* (3.6.1)

## 3.5 Durchfluss

### 3.5.1

#### Massendurchfluss

$q_m$   
durch die *CFN* (3.3.6) durchgeflossene Masse eines Gases, dividiert durch die Zeit

Anmerkung 1 zum Begriff: In diesem Dokument bezieht sich der Begriff „Massendurchfluss“ ohne irgendein Adjektiv immer auf den wahren Massendurchfluss durch die *CFN*.

### 3.5.2

#### theoretischer Massendurchfluss eines idealen Gases

$q_{th,P}$   
theoretischer Massendurchfluss durch die *CFN* (3.3.6) unter der Annahme einer eindimensionalen *isentropen Strömung* (3.4.1) eines *idealen Gases* (3.6.1)

### 3.5.3

#### theoretischer Massendurchfluss eines realen Gases

$q_{th,R}$   
theoretischer Massendurchfluss durch die *CFN* (3.3.6) unter der Annahme einer eindimensionalen *isentropen Strömung* (3.4.1) eines *realen Gases* (3.6.1)

### 3.5.4

#### Volumendurchfluss

$q_v$   
Volumen des Gases, das durch die Leitung, in die die *CFN* (3.3.6) eingebaut ist, je Zeiteinheit an einer bestimmten Stelle strömt (siehe Anhang J)

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Volumendurchfluss an der bestimmten Stelle, an der die Dichte  $\rho$  beträgt, ergibt sich aus:

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

### 3.5.5

#### Reynolds-Zahl

Reynoldszahl

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

dimensionsloser Parameter (Kenngröße der Dimension Zahl), berechnet aus dem Durchmesser des Halsteils, dem *Massendurchfluss* (3.5.1) und der dynamischen Viskosität des Gases bei absoluten Bedingungen (Staubedingungen) im Einlaufrohr der CFN (3.3.6) (siehe Anhang J)

### 3.5.6

#### Durchflusskoeffizient

$$C_d = \frac{q_m}{q_{th,R}}$$

Verhältnis von *Massendurchfluss* (3.5.1) zum theoretischen Durchfluss eines *realen Gases* (3.6.1) bei gleichen absoluten Bedingungen (Staubedingungen) im Einlaufrohr

### 3.5.7

#### kritisches Druckverhältnis

Verhältnis von *kritischem Druck* (3.4.5) eines *idealen Gases* (3.6.1) zum *absoluten Gesamtdruck* (3.1.2) im Einlaufrohr

### 3.5.8

#### Ausgangsdruckverhältnis

Verhältnis von *statischem Druck* (3.1.1) am Diffusorausgang zum *absoluten Gesamtdruck* (3.1.2) im Einlaufrohr

### 3.5.9

#### lokale Mach-Zahl

lokale Machzahl

$M_a$

Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeit zur lokalen Schallgeschwindigkeit

### 3.5.10

#### Mach-Zahl in der Einlaufleitung

Machzahl in der Einlaufleitung

$M_{ac}$

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

Anmerkung 1 zum Begriff:  $M_{ac}$  braucht kein genauer Wert zu sein und darf wie folgt angenähert werden:

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

### 3.5.11

#### Messunsicherheit

Unsicherheit

Parameter für die Messergebnisse, der die Streuung der Messwerte kennzeichnet, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden könnte

### 3.6 Gas

#### 3.6.1

##### ideales Gas

theoretisches Gas, dessen *Isentropenexponent* (3.6.6) der Wärmekapazität entspricht, die in jedem Zustand des Gases konstant ist, und bei dem auch der *Realgasfaktor* (3.6.3) immer gleich eins ist

#### 3.6.2

##### reales Gas

tatsächliches Gas, dessen *Isentropenexponent* (3.6.6) und *Realgasfaktor* (3.6.3) von seinem Druck und seiner Temperatur abhängig sind

#### 3.6.3

##### Realgasfaktor

$Z$

Korrekturfaktor für die Abweichung der Realgaskonstanten von der universellen Gaskonstanten (siehe Anhang J)

#### 3.6.4

##### Beiwert der kritischen Strömung

kritische Durchflussfunktion

$C^*$

dimensionslose Funktion, die die thermodynamischen Eigenschaften des Gases am Halsteil der *CFN* (3.3.6) mit den absoluten Bedingungen (Staubedingungen) im Einlaufrohr in Beziehung setzt, unter Annahme einer eindimensionalen *isentropen Strömung* (3.4.1)

#### 3.6.5

##### Beiwert der kritischen Strömung für die Durchflussgleichung über die Dichte

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

alternativer *Beiwert der kritischen Strömung* (3.6.4) zur Verwendung in der Gleichung für den *Massendurchfluss* (3.5.1) über die Dichte

#### 3.6.6

##### Isentropenexponent

$\kappa$

Verhältnis der relativen Druckänderung zur entsprechenden relativen Änderung der Dichte während des isentropen Prozesses

## 4 Symbole und Abkürzungen

| Symbol                | Bedeutung                                                                       | Dimension <sup>N1)</sup> | SI-Einheit       |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------|
| $a, b, c, d, e, f, n$ | Koeffizienten für Gleichung (17)                                                | Dimensionslos            | —                |
| $A$                   | Strömungsquerschnitt                                                            | $L^2$                    | $m^2$            |
| $A^*$                 | Strömungsquerschnitt am kritischen Punkt                                        | $L^2$                    | $m^2$            |
| $A_2$                 | Querschnittsfläche des Ausgangs der Düse                                        | $L^2$                    | $m^2$            |
| $A_{nt}$              | Querschnittsfläche am kritischen Punkt bei Betriebstemperatur der CFN           | $L^2$                    | $m^2$            |
| $c$                   | lokale Schallgeschwindigkeit                                                    | $LT^{-1}$                | $m \cdot s^{-1}$ |
| $c^*$ N2)             | 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            | —                |
| $C_\mu$               | Parameter für die Gleichung von $\mu$                                           | Dimensionslos            | —                |
| $C_d$                 | Durchflusskoeffizient                                                           | Dimensionslos            | —                |
| $C_d^{target}$        | Sollwert des Durchflusskoeffizienten, der durch Anwendung der DCM erhalten wird | Dimensionslos            | —                |
| $C_d^{ISO}$           | Durchflusskoeffizient, der mit Gleichung (17) berechnet wird                    | Dimensionslos            | —                |
| $C^*$                 | Beiwert der kritischen Strömung                                                 | Dimensionslos            | —                |
| $C_D^*$               | Beiwert der kritischen Strömung für die Durchflussgleichung über die Dichte     | Dimensionslos            | —                |
| $C_p^*$               | Beiwert der kritischen Strömung eines idealen Gases                             | Dimensionslos            | —                |
| $C^{*DA}$             | Beiwert der kritischen Strömung von trockener Luft                              | Dimensionslos            | —                |
| $C^{*HA}$             | Beiwert der kritischen Strömung von feuchter Luft                               | Dimensionslos            | —                |
| $C_{i,j}$             | Koeffizient zur Berechnung von $C^*$                                            | b                        | b                |
| $c_v$                 | Kovarianz                                                                       | Dimensionslos            | —                |
| $D$                   | Durchmesser der Einlaufleitung                                                  | L                        | m                |
| $d_{DCM}$             | Durchmesser des Halsteils, korrigiert mit dem DCM                               | L                        | m                |

N1) Nationale Fußnote: Siehe DIN EN ISO 80000-1 für weitere Angaben zu Dimensionen. Die deutschsprachige Benennung „dimensionslose Größe“ ist veraltet. Sie wird aus Konsistenzgründen entsprechend dem in der englischsprachigen Referenzfassung verwendeten Begriff „dimensionless“ hier und an anderen Stellen im Dokument dennoch verwendet. Eine Größe, deren Dimensionsexponenten alle gleich Null sind, hat das Dimensionsprodukt  $A^0 B^0 C^0 \dots = 1$ , wobei das Zeichen 1 die entsprechende Dimension bezeichnet. Es besteht keine Einigkeit darüber, wie derartige Größen zu bezeichnen sind. Neben der Bezeichnung „dimensionslose Größe“ werden die Begriffe „Größe der Dimension Eins“, „Größe der Dimension Zahl“ oder „Größe mit der Einheit Eins“ verwendet.

N2) Nationale Fußnote: In Anhang B wird für die lokale Schallgeschwindigkeit am kritischen Punkt das Symbol  $v^*$  verwendet.

| Symbol     | Bedeutung                                                                                                                                                              | Dimension <sup>N1)</sup>                         | SI-Einheit                          |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|
| $d_{nt}$   | Durchmesser des Halsteils der CFN bei Betriebstemperatur                                                                                                               | L                                                | m                                   |
| $d_{nt0}$  | gemessener Durchmesser des Halsteils (bei der Temperatur $T_{nt0}$ )                                                                                                   | L                                                | m                                   |
| $d_{ORI}$  | für das DCM verwendeter Durchmesser des Halsteils aus der Kalibrierung                                                                                                 | L                                                | m                                   |
| $d_p$      | Durchmesser der Wand-Druckentnahme in der Leitung                                                                                                                      | L                                                | m                                   |
| $H_R$      | relative Luftfeuchte                                                                                                                                                   | %                                                | —                                   |
| $k$        | Erweiterungsfaktor                                                                                                                                                     | Dimensionslos                                    | —                                   |
| $l$        | Diffusorlänge                                                                                                                                                          | L                                                | m                                   |
| $l_1$      | Abstand zwischen dem Ausgang des Etoile-Gleichrichters und der Eintrittsebene der Düse                                                                                 | L                                                | m                                   |
| $l_2$      | Länge des Etoile-Gleichrichters                                                                                                                                        | L                                                | m                                   |
| $M$        | molare Masse                                                                                                                                                           | M                                                | kg·mol <sup>-1</sup>                |
| $M_a$      | lokale Mach-Zahl                                                                                                                                                       | Dimensionslos                                    | —                                   |
| $M_{a2}$   | lokale Mach-Zahl am Ausgang der CFN unter der Annahme, dass die Strömung im Diffusor vollständig im Unterschallbereich liegt                                           | Dimensionslos                                    | —                                   |
| $M_{aC}$   | lokale Mach-Zahl an der Druckentnahme im Einlaufrohr                                                                                                                   | Dimensionslos                                    | —                                   |
| $p$        | statischer Druck des Gases                                                                                                                                             | ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>                 | Pa                                  |
| $p_0$      | absoluter Gesamtdruck des Gases im Einlauf der CFN                                                                                                                     | ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>                 | Pa                                  |
| $p_1$      | statischer Druck des Gases, gemessen durch die Wand-Druckentnahme in der Einlaufleitung                                                                                | ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>                 | Pa                                  |
| $p_2$      | statischer Druck des Gases am Diffusorausgang                                                                                                                          | ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>                 | Pa                                  |
| $p_{2i}$   | theoretischer statischer Druck des Gases am Ausgang des Diffusors, wenn die Düse gedrosselt ist, aber die Strömung im Diffusor vollständig im Unterschallbereich liegt | ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>                 | Pa                                  |
| $p_{den}$  | statischer Druck im Gas am Dichtemessgerät                                                                                                                             | ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>                 | Pa                                  |
| $P_r$      | Prandtl-Zahl                                                                                                                                                           | Dimensionslos                                    | —                                   |
| $p^*$      | statischer Druck am kritischen Punkt (kritischer Druck)                                                                                                                | ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>                 | Pa                                  |
| $p_P^*$    | theoretischer statischer Druck am kritischen Punkt eines idealen Gases (kritischer Druck eines idealen Gases)                                                          | ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>                 | Pa                                  |
| $q_m$      | Massendurchfluss (wahrer Massendurchfluss)                                                                                                                             | MT <sup>-1</sup>                                 | kg·s <sup>-1</sup>                  |
| $q_{th,P}$ | theoretischer Massendurchfluss eines idealen Gases                                                                                                                     | MT <sup>-1</sup>                                 | kg·s <sup>-1</sup>                  |
| $q_{th,R}$ | theoretischer Massendurchfluss eines realen Gases                                                                                                                      | MT <sup>-1</sup>                                 | kg·s <sup>-1</sup>                  |
| $q_V$      | Volumendurchfluss                                                                                                                                                      | MT <sup>-1</sup>                                 | kg·s <sup>-1</sup>                  |
| $R$        | universelle Gaskonstante (8,314 5 J/(mol·K))                                                                                                                           | M·L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> Θ <sup>-1</sup> | J·mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| $R_a$      | arithmetischer Mittenrauwert                                                                                                                                           | L                                                | m                                   |

| Symbol          | Bedeutung                                                                                        | Dimension <sup>N1)</sup> | SI-Einheit |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------|
| $R_e$ oder $Re$ | Reynolds-Zahl                                                                                    | Dimensionslos            | —          |
| $Re^{ORI}$      | für das DCM verwendete Reynolds-Zahl aus der Kalibrierung                                        | Dimensionslos            | —          |
| $R_f$           | Rückgewinnungsfaktor                                                                             | Dimensionslos            | —          |
| $r_c$           | Radius der Engstelle in der Einlaufleitung                                                       | L                        | m          |
| $r_{CBP}$       | kritisches Ausgangsdruckverhältnis (en: critical back-pressure ratio)                            | Dimensionslos            | —          |
| $r_{nt}$        | Radius in der Nähe des Einlaufs des Halsteils einer CFN mit Zylinderhals                         | L                        | m          |
| $T$             | statische Temperatur des Gases                                                                   | $\Theta$                 | K          |
| $T_0$           | Ruhetemperatur des Gases am Einlauf der CFN                                                      | $\Theta$                 | K          |
| $T_1$           | gemessene Temperatur des Gases am Einlauf der CFN                                                | $\Theta$                 | K          |
| $T_{den}$       | statische Temperatur am Dichtemessgerät                                                          | $\Theta$                 | K          |
| $T_m$           | gemessene Temperatur                                                                             | $\Theta$                 | K          |
| $T_{nt0}$       | Temperatur während der Messung des Durchmessers des Halsteils                                    | $\Theta$                 | K          |
| $T^*$           | statische Temperatur am kritischen Punkt (kritische Temperatur)                                  | $\Theta$                 | K          |
| $T_P^*$         | theoretische statische Temperatur am kritischen Punkt (kritische Temperatur) eines idealen Gases | $\Theta$                 | K          |
| $T_{C^*}$       | Parameter für die Gleichung von $C^*$                                                            | $\Theta$                 | K          |
| $T_\mu$         | Parameter für die Gleichung von $\mu$                                                            | $\Theta$                 | K          |
| $u$             | Standardunsicherheit ( $k = 1$ )                                                                 | b                        | —          |
| $u_c$           | kombinierte Standardunsicherheit ( $k = 1$ )                                                     | b                        | —          |
| $U$             | erweiterte Messunsicherheit (mit festgelegtem Erweiterungsfaktor $k$ )                           | b                        | $U$        |
| $V_{i,j}$       | Koeffizient zur Berechnung der Viskosität                                                        | b                        | $U$        |
| $x_i$           | Stoffmengenanteil des $i$ -ten Bestandteils                                                      | Dimensionslos            | —          |
| $Z$             | Realgasfaktor                                                                                    | Dimensionslos            | —          |
| $Z_0$           | Realgasfaktor bei absoluten Bedingungen (Staubedingungen) im Einlaufrohr                         | Dimensionslos            | —          |
| $Z_{den}$       | Realgasfaktor am Dichtemessgerät                                                                 | Dimensionslos            | —          |
| $\alpha$        | Längenausdehnungskoeffizient des Werkstoffs der Düse                                             | $\Theta^{-1}$            | $K^{-1}$   |
| $\beta$         | Verhältnis der Durchmesser von Halsteil und Rohrleitung ( $d_{nt}/D$ )                           | Dimensionslos            | —          |
| $\delta$        | absolute Messunsicherheit                                                                        | a                        | a          |
| $\gamma$        | Verhältnis der Wärmekapazitäten                                                                  | Dimensionslos            | —          |

| Symbol                                                                                                                                                 | Bedeutung                                                                                                    | Dimension <sup>N1)</sup> | SI-Einheit         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------|
| $\kappa$                                                                                                                                               | Isentropenexponent                                                                                           | Dimensionslos            | —                  |
| $\mu_0$                                                                                                                                                | dynamische Viskosität des Gases bei absoluten Bedingungen (Staubedingungen) im Einlaufrohr                   | $ML^{-1}T^{-1}$          | Pa·s               |
| $\mu$                                                                                                                                                  | dynamische Viskosität des Gases                                                                              | $ML^{-1}T^{-1}$          | Pa·s               |
| $\theta$                                                                                                                                               | Winkel zwischen der Wand eines Kegelstumpfdiffusors und der Symmetrieachse der Düse                          | Dimensionslos            | rad                |
| $\rho$                                                                                                                                                 | Dichte des Gases                                                                                             | $ML^{-3}$                | kg                 |
| $\rho_0$                                                                                                                                               | Dichte des Gases bei absoluten Bedingungen (Staubedingungen) im Einlaufrohr                                  | $ML^{-3}$                | kg·m <sup>-3</sup> |
| $\rho_{\text{den}}$                                                                                                                                    | Dichte des Gases, gemessen mit einem Dichtemessgerät                                                         | $ML^{-3}$                | kg·m <sup>-3</sup> |
| $\rho^*$                                                                                                                                               | theoretische Dichte des Gases am kritischen Punkt (kritische Dichte)                                         | $ML^{-3}$                | kg·m <sup>-3</sup> |
| $\rho_P^*$                                                                                                                                             | theoretische Dichte des Gases am kritischen Punkt eines idealen Gases (kritische Dichte eines idealen Gases) | $ML^{-3}$                | kg·m <sup>-3</sup> |
| $M$ = Masse<br>$L$ = Länge<br>$T$ = Zeit<br>$\theta$ = Temperatur                                                                                      |                                                                                                              |                          |                    |
| <sup>a</sup> Die Dimension dieses Parameters ist die der Größe, auf die er sich bezieht.<br><sup>b</sup> Abhängig von jedem Ausdruck in der Gleichung. |                                                                                                              |                          |                    |

| Abkürzung | Bedeutung                                                                   |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|
| AOS       | Symmetrieachse (en: axis of symmetry)                                       |
| CFN       | Düse bei kritischer Strömung (en: critical flow nozzle)                     |
| CL        | Mittellinie (en: center line)                                               |
| DCM       | Verfahren zur Korrektur des Durchmessers (en: diameter correction method)   |
| HPN       | hochgenau bearbeitete Düse (en: high precision nozzle)                      |
| NPN       | üblich bearbeitete Düse (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 durch Gleichung (1) und Gleichung (2) miteinander in Beziehung:

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

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

#### 5.1.2 Zustandsgleichung

Das Verhalten eines realen Gases wird mithilfe von Gleichung (3) 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 nach Gleichung (4) in Beziehung zur lokalen Mach-Zahl:

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

#### 5.2.2 Statischer Druck

Der statische Druck steht nach Gleichung (5) in 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 nach Gleichung (6) in 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 hergeleitet.

### 5.3.2 Kritischer Druck

Der theoretische statische Druck am kritischen Punkt wird durch Gleichung (7) angegeben:

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

### 5.3.3 Kritische Temperatur

Die theoretische statische Temperatur am kritischen Punkt wird durch Gleichung (8) angegeben:

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

### 5.3.4 Kritische Dichte

Die theoretische Dichte am kritischen Punkt wird durch Gleichung (9) angegeben:

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

### 5.3.5 Kritische Geschwindigkeit

Die theoretische Strömungsgeschwindigkeit am kritischen Punkt wird durch Gleichung (10) angegeben:

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

## 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 hergeleitet.

### 5.4.2 Theoretischer Massendurchfluss eines idealen Gases

Der theoretische Massendurchfluss eines idealen Gases ist definiert als 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  $k = \gamma$ , entsprechend Gleichung (11):

$$q_{th,P} \equiv A^* c_P^* \rho_P^* = A^* C_P^* \frac{p_0}{\sqrt{\left( \frac{R}{M} \right) T_0}} \quad (11)$$

### 5.4.3 Theoretischer Massendurchfluss eines realen Gases

Der theoretische Massendurchfluss eines realen Gases ist definiert als das Produkt aus dem Strömungsquerschnitt, der lokalen Schallgeschwindigkeit und der Dichte am kritischen Punkt unter der Annahme einer eindimensionalen isentropen Strömung eines realen Gases, was durch Gleichung (12) angegeben wird:

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

### 5.5 Massendurchfluss

Der Massendurchfluss einer CFN wird durch Gleichung (13) oder Gleichung (14) angegeben:

$$q_m = C_d q_{th,R} \quad (13)$$

oder

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

## 6 Allgemeine Anforderungen

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

ANMERKUNG Das übliche Druckverhältnis, das für den Betrieb der CFN mit einem ausreichend langen Diffusor erforderlich ist, kann bei hohen Reynolds-Zahlen, z. B. größer als  $2 \times 10^5$  (entspricht einer CFN mit etwa  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  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).

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

ANMERKUNG Für ein Gasgemisch muss die genaue Gaszusammensetzung bekannt sein, um  $C^*$  mit einer ausreichend geringen Messunsicherheit zu berechnen.

Können die folgenden Anforderungen nicht erfüllt werden, muss eine Durchflusskalibrierung der CFN unter denselben Bedingungen wie bei ihrer Anwendung erfolgen.

- Das Gas sollte keinen signifikanten Relaxationseffekt zeigen (siehe Abschnitt B.5).
- Die Temperatur des Gases und die Temperatur der CFN sollten stabil sein (siehe Anhang J).
- Form und Oberfläche von Engstelle und Halsteil sollten mit der in Abschnitt 8 festgelegten Genauigkeit gearbeitet sein (siehe Anhang G).

- g) Die Form der CFN wird regelmäßig überprüft, besonders an der Engstelle und am Halsteil (siehe Anhang G).

ANMERKUNG Engstelle und Halsteil können sich durch die Stoßwirkung von im Gas enthaltenen Feststoffen mit der Zeit verformen.

Engstelle und Halsteil müssen ihre Sauberkeit und folglich ihre Oberflächenbeschaffenheit beibehalten. Wenn dies nicht sichergestellt werden kann, dann darf keine Übereinstimmung zwischen der Messung und diesem Dokument 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 Gebrauchs- oder Bezugsnorm zur Kalibrierung anderer Durchflussmessgeräte, als Prüf- oder TransfERNormal (Übertragungsnorm) zur Überprüfung oder zum Vergleich von Kalibriereinrichtungen, als Regler für Durchflüsse und so weiter.

Wichtige Aspekte dabei sind:

- a) Massen- und Volumendurchfluss einer CFN sind von den Bedingungen in der Nachlaufleitung unabhängig.
- b) Der Volumendurchfluss der Leitung, in die eine CFN eingebaut ist, ist bei konstanter Temperatur bei jedem Vordruck nahezu konstant.

ANMERKUNG Mehrere parallel geschaltete CFNs (z. B. bei der Kammerkonfiguration) werden benötigt, um den Volumendurchfluss im CFN-System bei konstantem Druck im Einlaufrohr zu verändern (siehe 9.3 und Anhang J).

Weitere Aspekte sind:

- c) Präzise Druck- und Temperaturmessungen (oder Dichtemessung mittels eines Dichtemessgeräts) sind nur an der Einlaufseite der CFN erforderlich.
- d) Der Nachdruck sollte überwacht oder abgeschätzt werden, um zu bestätigen, dass die CFN gedrosselt wird.
- e) Der durch die CFN gemessene Massendurchfluss verhält sich proportional zum absoluten Gesamtdruck in der Einlaufleitung, d. h. der maximale erreichbare Massendurchfluss der CFN wird praktisch durch den jeweiligen maximalen Druck in der Einlaufleitung begrenzt. (siehe Anhang J).

## **8 CFNs**

### **8.1 Allgemeine Anforderungen an beide CFN-Normausführungen**

#### **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.

Eine Überprüfung von Form und Maßen mittels eines Koordinatenmessgeräts (CMM, en: coordinate-measuring machine) ist erforderlich. Wenn die in diesem Abschnitt festgelegten Fertigungstoleranzen einschließlich der Rauigkeit nicht erreicht oder durch eine Überprüfung festgestellt 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 Aspekte 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 Kratern, Lunkern und mangelnder Homogenität ungeeignet.

- b) dass der Werkstoff nach einer Oberflächenbehandlung bei bestimmungsgemäßer Verwendung nicht korrodieren darf;
- c) dass der Werkstoff formstabil sein und ein bekanntes und reproduzierbares Wärmeausdehnungsverhalten haben sollte, damit die Korrektur des Durchmessers des Halsteils nach Gleichung (16) vorgenommen werden kann.

### 8.1.3 Engstelle und Halsteil

Engstelle und Halsteil der CFN müssen folgende Eigenschaften aufweisen:

- a) achsensymmetrisch um die Mittellinie (Symmetrieachse, AOS) der CFN;
- b) glattgeschliffen, 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 und

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, wovon der Durchflusskoeffizient direkt abhängt, ebenso wie eine präzise Messung des Durchmessers des Halsteils, besonders bei kleinen Düsen, weshalb große Sorgfalt angewendet werden sollte.

Große Sorgfalt ist auch beim Polieren von Engstelle und Halsteil 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 der Verwendung eines herkömmlichen Diffusors ist es in Übereinstimmung mit dieser Anforderung zulässig, überhaupt keinen Diffusor, abnehmbare Diffusoren [2] und eine Stufe genau am Halsteil und/oder im Diffusor [12] zu verwenden (siehe Anhang J).

Ein herkömmlicher Diffusor sollte integraler Bestandteil der Düse sein, was durch Fertigung aus einem Stück erreicht wird. Es sollte sichergestellt werden, dass Stufen, Fehlstellen, Unregelmäßigkeiten und mangelnde Konzentrität nicht mehr als 1 % des lokalen Durchmessers ausmachen. Die Länge sollte  $d_{nt}$  nicht unterschreiten. Wenn eine stufenförmige Änderung des Durchmessers im Diffusor vorliegt, dann sollte der Durchmesser stromabwärts zunehmen (nicht abnehmen). Der arithmetische Mittenrauwert 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 bei niedrigen Reynolds-Zahlen das Verhalten des Diffusors in unvorhersehbarer Weise [4] [12]. Wenn das kritische Ausgangsdruckverhältnis für den Betrieb des Systems bei niedrigen Reynolds-Zahlen, z. B. kleiner als  $2 \times 10^5$ , von wesentlicher Bedeutung ist, sollte das tatsächliche kritische Ausgangsdruckverhältnis experimentell bestimmt werden, unter Verwendung genau derselben CFN mit der zugehörigen Rohrleitung wie für die eigentliche Anwendung, da das Auftreten des PUP wesentlich von geringen Unterschieden der Form und/oder Beschaffenheit der CFN sowie den Einbaubedingungen abhängen kann [9] [11].

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

Unabhängig davon, ob der Diffusor integraler Bestandteil oder abnehmbar ist, muss der Diffusoreinlauf sehr vorsichtig bearbeitet werden, um das Halsteil nicht zu beschädigen oder zu verstopfen, z. B. beim Anbringen des abnehmbaren Diffusors.

## **8.2 Anforderungen an die CFN-Normausführungen**

### **8.2.1 CFN mit Toroidhals**

Es gibt zwei Formen von genormten CFNs:

- a) CFN mit Toroidhals;
- b) 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 müssen CFNs 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, die die Engstelle bei einem Durchmesser von  $(2,5 \pm 0,1) d_{nt}$  schneidet, unabhängig von der Form vor der IP.

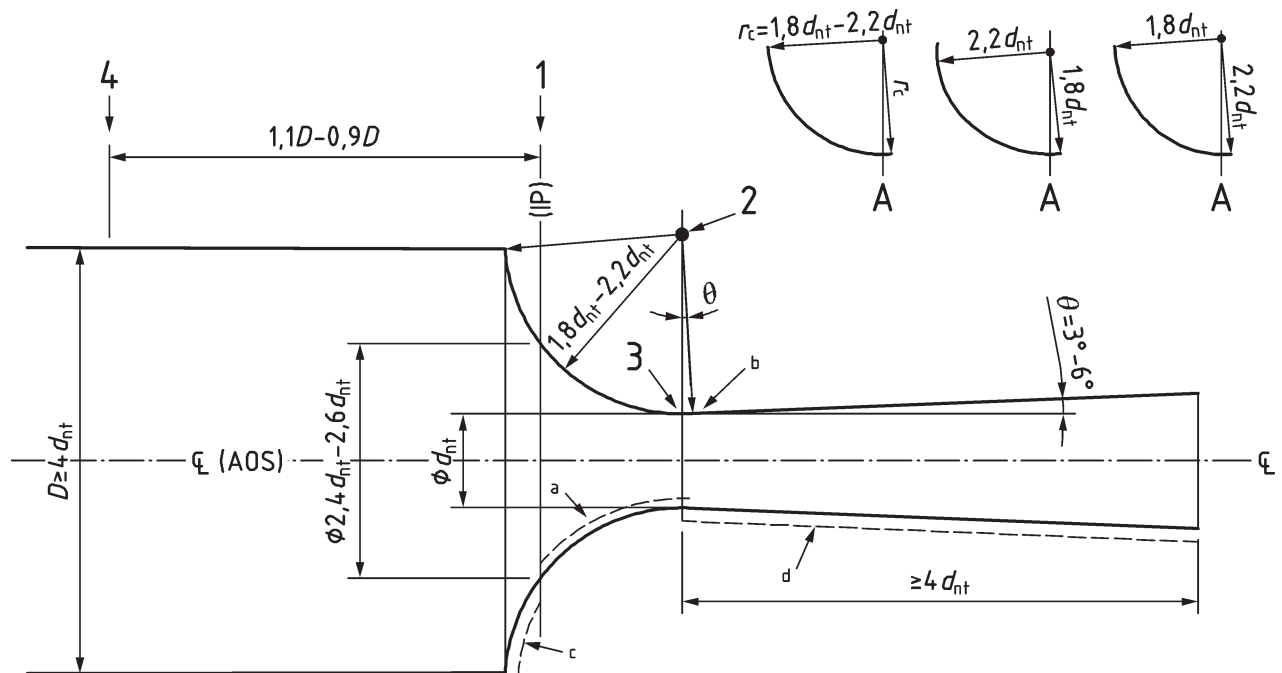
**8.2.2.3** Stromabwärts von der IP (rechts von der IP in Bild 1) muss der Diffusor in Form eines Torusabschnitts gestaltet sein. Am Halsteil muss die Oberflächentangente (TLS) parallel zur Symmetrieachse der Düse verlaufen. Eine kurzer Torus, bei dem die Oberflächentangente des Halsteils nicht parallel zur Symmetrieachse der Düse verläuft, muss vermieden werden, da hier bereits kleine Abweichungen zu großen Messabweichungen führen können. 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 dem Halsteil, wobei die TLS des Torus-Endes einen Winkel von etwa  $3^\circ$  zur Symmetrieachse der Düse bildet.

**8.2.2.4** Wenn der Diffusor ein integraler Bestandteil der Düse ist, muss bei der Bearbeitung des Diffusors hinter dem Halsteil große Vorsicht geboten werden, da schon eine geringe Gegenbewegung der Drehmaschine unerwartete Formen genau am Halsteil erzeugen kann, die sich erheblich auf den Durchflusskoeffizienten auswirken können. Nach der Bearbeitung sollte eine sorgfältige Formprüfung des Halsteils durchgeführt werden; wenn dann eine Unregelmäßigkeit am Halsteil festgestellt wird, sollte die CFN einer Durchflusskalibrierung unterzogen 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 (IP) und dem Halsteil darf konstant sein oder gleichmäßig zwischen  $1,8 d_{nt}$  und  $2,2 d_{nt}$  variieren, sofern ein variierender Radius die Strömung im Halsteil nicht stört. Beispiele für einen Torus mit konstantem und mit variablem Radius sind in Bild 1 dargestellt.

**8.2.2.7** Der Halbwinkel eines herkömmlichen Diffusors sollte zwischen  $3,0^\circ$  und  $6,0^\circ$  liegen, und sich gleichmäßig mit dem Torus-Ende bei gleicher TLS wie in Bild 1 berühren.



#### Legende

- 1 Eintrittsebene (IP) (Siehe 8.2.2.2 für die Definition, braucht keine physikalische Ebene zu sein)
- 2 Mittelpunkt des einlaufseitigen Torus
- 3 Halsteil
- 4 Lage der Druckentnahme
- A Beispiele für den einlaufseitigen Torus (konstante und variable Radien)
- a Siehe 8.2.2.3 und 8.2.2.6.
- b Kontaktebene zwischen einlaufseitigem 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** Neben 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.

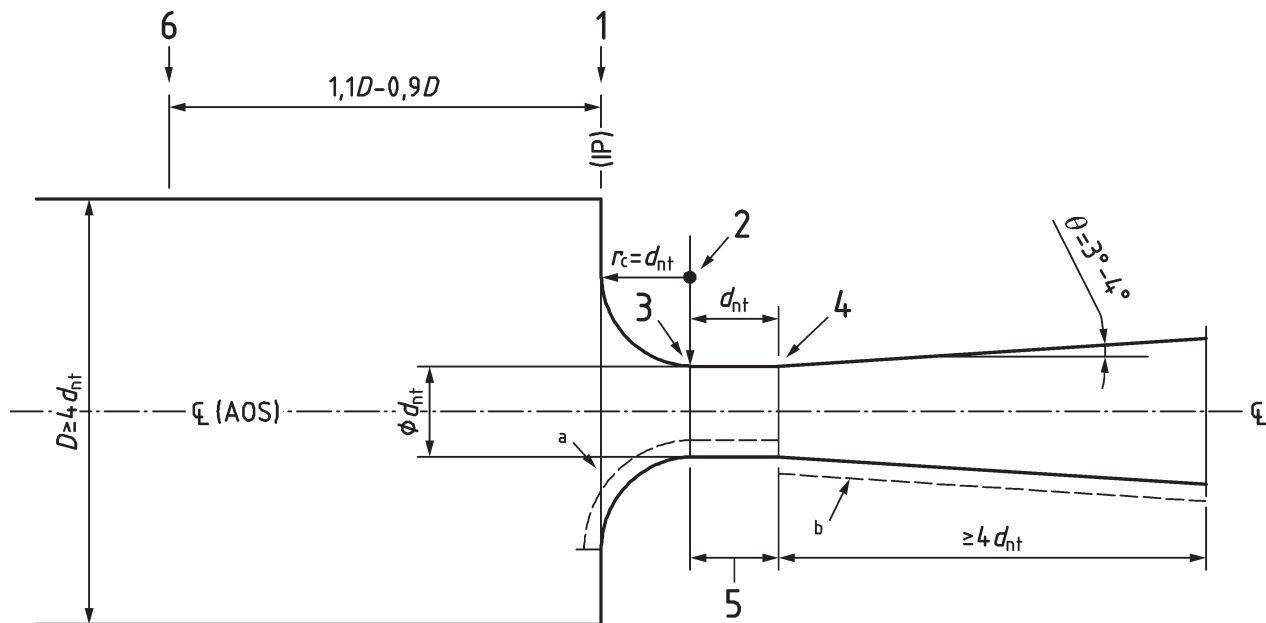
**8.2.3.6** Der Halsdurchmesser  $d_{nt}$  muss durch den mittleren Durchmesser am Halsauslauf definiert werden. Der mittlere Durchmesser muss durch die Messung von mindestens vier gleichwinklig verteilten Durchmessern am Auslauf des Zylinderhalses bestimmt werden. Kein Durchmesser entlang des Halsteils 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 zwischen Engstelle und 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 Defekte untersucht werden.

**8.2.3.9** Die Oberflächen von Engstelle und Halsteil müssen ordentlich poliert werden, sodass der arithmetische Mittenrauwert  $15 \times 10^{-6} d_{nt}$  nicht überschreitet, sofern er gemessen werden kann.

**8.2.3.10** Der Halbwinkel eines herkömmlichen Diffusors sollte zwischen  $3^\circ$  und  $4^\circ$  liegen.



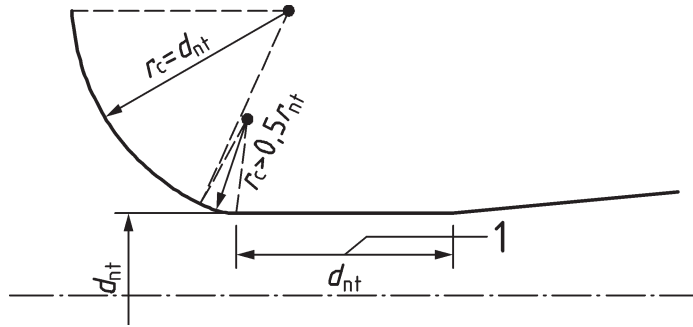
#### Legende

- 1 Eintrittsebene (physische Ebene)
- 2 Mittelpunkt des einlaufseitigen Torus
- 3 Halseinlauf
- 4 Halsausgang
- 5 Halsteil
- 6 Lage der Druckentnahme

<sup>a</sup> Zylinderhals. In diesem Bereich gilt für den arithmetischen Mittenrauwert:  $R_a \leq 15 \times 10^{-6} d_{nt}$  und die Kontur darf von der Torus- und Zylinderform um nicht mehr als  $\pm 0,001 d_{nt}$  abweichen.

<sup>b</sup> Die Länge sollte größer sein als  $d_{nt}$ , vorzugsweise sogar 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 Normkonfigurationen

#### 9.1.1 Normkonfigurationen

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

- Rohrkonfiguration: in einem Rohr mit kreisrundem Querschnitt mit  $\beta \leq 0,25$ ; oder
- Kammerkonfiguration: mit einem großen Volumen (Kammer oder Raum) vor der CFN, sodass  $\beta$  angenähert 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 Druckentnahme im Einlaufrohr

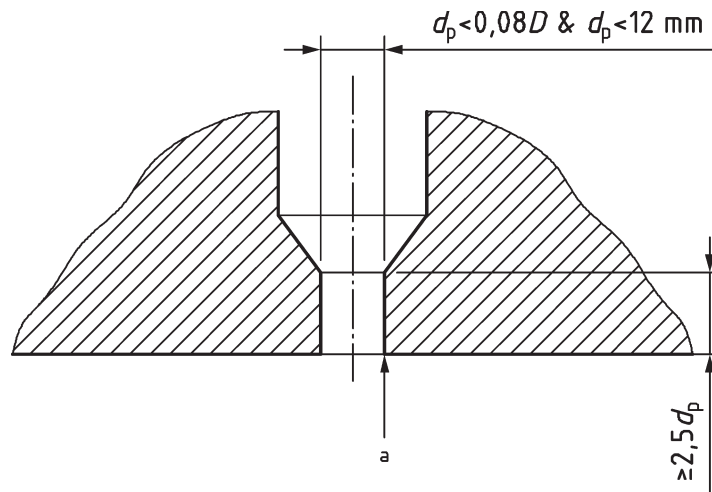
Der statische Druck im Einlaufrohr der CFN muss durch eine oder mehrere Wand-Druckentnahme(n), die durch die Rohr- bzw. Kammerwand vor der CFN gebohrt wurde(n), gemessen werden.

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

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

- die Mittellinie muss senkrecht zur Symmetrieachse der Düse verlaufen;
- der Querschnitt der Bohrung in der Leitung muss am Ort des Durchbruchs kreisförmig sein;
- 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;
- die Kante der Bohrung muss rechtwinklig oder mit einem Radius von nicht mehr als  $0,1 d_p$  abgerundet sein; und
- die Kante der Bohrung muss gratfrei sein.

Mithilfe einer Sichtprüfung muss bestätigt werden, dass diese Anforderungen erfüllt sind.



### Legende

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

**Bild 4 — Einzelheit der Wand-Druckentnahme**

#### 9.1.3 Druckentnahme am Auslaufrohr

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

Bei einigen Anwendungen kann der Austrittsdruck ohne Verwendung einer Wand-Druckentnahme bestimmt werden, z. B. wenn die CFN direkt in ein großes Volumen 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 Volumen dargestellt werden (siehe Anhang J).

#### 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-Druckentnahme 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 Fühler 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 Anhang J). 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-Entnahmen am Einlaufrohr installiert werden.

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

- a) das Dichtemessgerät (Densitometer) darf die Messungen des statischen Drucks und der Ruhetemperatur im Einlaufrohr nicht stören;
- b) befindet sich das Dichtemessgerät in einer Umgehungsleitung des Einlaufrohrs oder einer CFN-Kammer, muss durch Prüfung sichergestellt werden, dass das Gas im Dichtemessgerät dasselbe ist wie das, das durch die Rohrleitung oder die Kammer strömt;
- c) um Korrekturen auf ein Mindestmaß zu begrenzen, sollten Druck und Temperatur am Dichtemessgerät so nah wie möglich am Druck und der Temperatur im Einlaufrohr der CFN liegen. Die Dichte im Ruhezustand der CFN muss nach Gleichung (15) berechnet werden:

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

### 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-Druckentnahmen im Einlaufrohr in einer axialen Ebene, die sich von der der Wand-Druckentnahmen unterscheidet, befinden, um die Messung des statischen Drucks im Einlaufrohr nicht zu stören.

Die Entleerungsbohrungen sollten vorzugsweise den in Bild 4 dargestellten Festlegungen für die Druckentnahmen entsprechen. Der Achsenabstand zwischen der Entleerungsbohrung und der Ebene der einlaufseitigen Wand-Druckentnahme muss größer als  $1 D$  sein.

### 9.1.7 Bedingungen im Nachlaufrohr

Es gibt keine einzuhaltenden Festlegungen für das Nachlaufrohr und die Nachlaufkammer, außer dass die kritische Strömung in der CFN bzw. in den CFNs nicht gestört werden darf.

## 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:

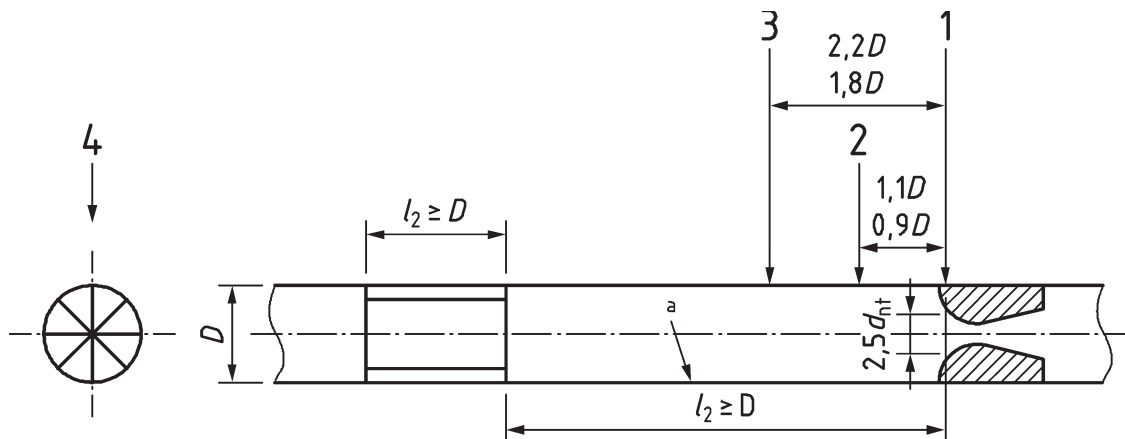
- a) muss gerade sein;
- b) muss einen kreisförmigen Querschnitt besitzen;

- 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 in einer Entfernung von bis zu  $3 D$  vor der Eintrittsebene um nicht mehr als  $0,01 D$  von der Kreisform abweichen und
- f) muss in einer Entfernung von bis zu  $3 D$  vor der Eintrittsebene einen arithmetischen Mittenrauwert von weniger als  $10^{-4} D$  aufweisen.

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

In dem Fall, dass  $\beta > 0,25$ , darf der nach Abschnitt 10 berechnete Massendurchfluss nach Anhang D korrigiert werden; besondere Vorsicht muss jedoch geboten sein, da die Messung des statischen Drucks einer schnell fließenden Strömung je nach Lage, Form und/oder Beschaffenheit der Druckentnahme leicht mit einer sehr großen Messabweichung behaftet sein kann. Darüber hinaus kann die Mehrdeutigkeit des Rückgewinnungsfaktors die Messung erheblich beeinflussen und auch der Druckabfall zwischen der Druckentnahme im Einlaufrohr und der Eintrittsebene ist möglicherweise nicht vernachlässigbar (siehe Anhang J).

Im Einlaufrohr darf keine Drallströmung auftreten. Bei bestimmten Strömungsgeschwindigkeiten im Einlaufrohr können drallfreie Bedingungen sichergestellt werden, indem ein Strömungsgleichrichter 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].



#### Legende

- 1 IP (Eintrittsebene)
- 2 Lage der Druckentnahme
- 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 Druckentnahme im Einlaufrohr sollte zwischen  $0,9 D$  und  $1,1 D$  vor der Eintrittsebene liegen.

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

Der Nachdruck darf durch eine Druckentnahme gemessen werden, die innerhalb von  $0,5 D$  hinter dem Diffusorausgang liegt. Weiter hinten im Nachlauf gelegene Stellen können ebenfalls genutzt werden, sofern dort keine wesentliche Druckänderung auftritt. Andere Lagen der Druckentnahme im Nachlauf können annehmbar sein, wenn eine Drosselungsprüfung (siehe Abschnitt H.4) an diesen Druckentnahmen 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 Anhang J.

## 9.3 Kammerkonfiguration

### 9.3.1 Allgemeines

Neben 9.1 muss die Kammerkonfiguration 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 ist, wenn sich die Symmetrieachse der Düse mindestens  $5 d_{nt}$  von allen Kammerwänden entfernt befindet.

Wenn mehrere CFNs parallel in eine Kammer eingebaut werden, muss der Mindestabstand zwischen den Symmetrieachsen zweier beliebiger CFNs größer sein als das 6-Fache des größten Halsdurchmessers, um Beeinträchtigungen zwischen den CFNs zu vermeiden, siehe [13] bis [19]. Es wird eine Prüfung empfohlen, um sicherzustellen, dass das Verhalten nicht durch Beeinträchtigungen der einzelnen CFNs untereinander sowie mit den Kammerwänden negativ beeinflusst wird.

### 9.3.3 Messung des Drucks

Die Wand-Druckentnahme 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 Strömungsgeschwindigkeit bis zum Stillstand verringert ist, um sicherzustellen, dass die gemessene Temperatur die Temperatur des Gases darstellt, das in jede CFN strömt. Für eine große Kammer werden mehrere Temperaturfühler empfohlen, da eine große Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer bis zum Stillstand verringerten Strömungsgeschwindigkeit 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 Annahme isentroper Bedingungen (siehe Anhang J) mit der Temperatur des Gases im Gleichgewicht ist; dementsprechend wird in diesem Dokument die Temperatur der CFN selbst durch die Temperatur des Gases angegeben. Wenn ein signifikanter Temperaturunterschied zwischen dem Gas, der CFN, der Rohrleitung und der Umgebung festgestellt wird, sollte der Anwender von einer fachkundigen Person beraten werden [56] (siehe Anhang J).

### 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. nach Gleichung (16) 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 Einflusses einer durch große Temperaturunterschiede verursachten nicht-isentropen Strömung geeignet ist. Siehe 10.1 und Anhang J.

### 10.3 Berechnung des Durchflusskoeffizienten $C_d$

**10.3.1** Der Durchflusskoeffizient der CFN sollte nach Gleichung (17) 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                      |                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $2,1 \cdot 10^4 < R_e < 3,2 \cdot 10^7$ | $a = 0,999\ 0$<br>$b = 3,415$<br>$c = 0,003\ 1$<br>$d = 0,690$<br>$e = 10$<br>$f = 120\ 000$<br>$n = +0,5$                                |
| CFN mit Zylinderhals                    |                                                                                                                                           |
| $1,5 \cdot 10^5 < R_e < 1,2 \cdot 10^7$ | $a = 1,000\ 0$<br>$b = 6,341$<br>$c = 0,009$ für Luft<br>$c = 0,008$ für Erdgas<br>$d = 3,000$<br>$e = 6$<br>$f = 170\ 000$<br>$n = +0,5$ |

Wenn das Gas einen signifikanten Schwingungsrelaxationseffekt hat, z. B.  $\text{CO}_2$  und  $\text{SF}_6$ , kann der Durchflusskoeffizient einen Beitrag von mehr als 1 % verursachen, wenn der stationäre Beiwert der kritischen Strömung (siehe 10.4) auf kleine CFNs angewendet 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 nach Gleichung (17) und Tabelle 1 berechneten Durchflusskoeffizienten beträgt 0,3 % mit einem 95 %-Vertrauensniveau.

#### 10.4 Berechnung des Beiwerts der kritischen Strömung $C^*$ oder $C_D^*$

Der Wert des Beiwerts der kritischen Strömung darf mit jeder Methode mit einer nachgewiesenen Genauigkeit berechnet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die meisten Methoden üblicherweise davon ausgehen, dass die Zustandsänderung des Gases entlang der Strömung im Gleichgewicht ist, und daher mit sehr großen Ungenauigkeiten behaftet sind, wenn das Gas aufgrund schneller Änderung der Fluideigenschaften keinen Gleichgewichtszustand erreichen kann. Siehe Abschnitt B.5.

Einige Beispiele für das anwendbare Methoden zur Berechnung von  $C^*$  und  $C_D^*$  für Erdgase sind der 8. AGA-Bericht (siehe [20] und [21]), die Reihe ISO 12213 (siehe [22] bis [24] und [31] bis [35]), sowie die Reihe ISO 20765 (siehe [25] und [26]) für die Zustandsgleichung. Dieser Ansatz stellt eine relative Messunsicherheit für  $C^*$  von 0,1 % mit einem 95 %-Vertrauensniveau sicher. Alternativ können andere Zustandsgleichungen mit vergleichbarer Unsicherheit verwendet werden.

Die Verwendung der Thermodynamik-Datenbank REFPROP [40] ist möglicherweise eine der praktikabelsten und genauesten Möglichkeiten zur Berechnung von  $C^*$ . Hierbei werden die Berechnungen auf der Grundlage aller Zustandsgleichungen der oben genannten Normen durchgeführt. Siehe Abschnitt B.3 und Anhang J.

Für einige Gase müssen die Werte von  $C^*$  nach Anhang C berechnet werden, ohne Verwendung einer bestimmten Software. Die Gleichungen wurden durch Kurvenanpassungen an die mittels REFPROP 10.0 ermittelten Berechnungsergebnisse erhalten.

### **10.5 Umrechnung des gemessenen Drucks in absoluten Gesamtdruck**

Der absolute Gesamtdruck im Einlaufrohr,  $p_0$ , sollte nach Gleichung (18) berechnet werden:

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

Für  $\beta \leq 0,15$  ist die Umrechnung vernachlässigbar, sodass sich  $p_0$  aus Gleichung (19) ergibt:

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

### **10.6 Umrechnung der gemessenen Temperatur in Ruhetemperatur**

Die Ruhetemperatur im Einlaufrohr,  $T_0$ , sollte nach Gleichung (20) berechnet werden:

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

Für  $\beta \leq 0,25$  ist der Effekt vernachlässigbar, sodass sich  $T_0$  aus Gleichung (21) ergibt:

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

Der Rückgewinnungsfaktor  $R_f$  darf mit jeder zuverlässigen Methode berechnet werden. Für  $\beta \leq 0,25$  darf er mithilfe von Gleichung (22) abgeschätzt werden:

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

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

### **10.7 Berechnung der Viskosität**

Der Wert der Viskosität darf mit jeder Methode mit einer nachgewiesenen Genauigkeit berechnet werden. Verwendung der REFPROP-Datenbank ist möglicherweise eine der praktikabelsten und genauesten Möglichkeiten zur Berechnung der Viskosität.

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

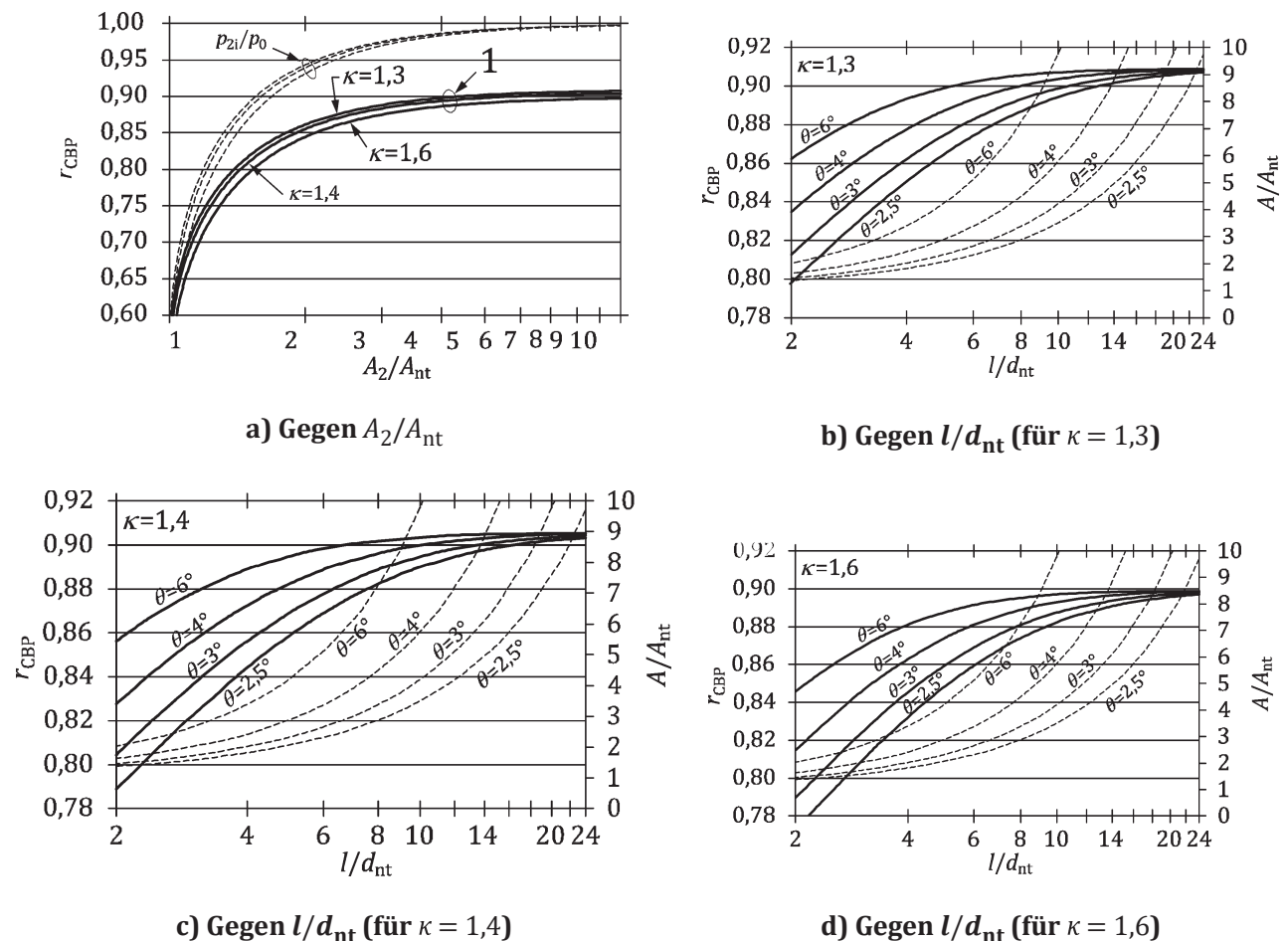
## 11 Abschätzung des kritischen Ausgangsdruckverhältnisses

### 11.1 Für einen herkömmlichen Diffusor bei Reynolds-Zahlen oberhalb von $2 \cdot 10^5$

Das kritische Ausgangsdruckverhältnis  $r_{CBP}$  für den herkömmlichen Diffusor bei Reynolds-Zahlen oberhalb von  $2 \cdot 10^5$  kann nach Gleichung (23) abgeschätzt werden [3]:

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

Dabei ist  $p_{2i}$  der theoretische statische Druck am Diffusorausgang, wenn die Düse die kritische Strömungsgeschwindigkeit erreicht, die Strömung im Diffusor aber vollständig im Unterschallbereich liegt und vollständig anliegend ist, 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  $l$  des Kegelstumpfdiffusors bei jedem Wandhalbwinkel  $\theta$  geschätzt werden können. Wie im Bild zu sehen ist, wird das kritische Ausgangsdruckverhältnis  $r_{CBP}$  durch eine Verlängerung des Diffusors nicht wesentlich erhöht, so dass beispielsweise für  $A_2/A_{nt} > 4$  gilt:  $l/d_{nt} > 7$  bei  $\theta = 4^\circ$ .



#### Legende

1 Gleichung (23)

—  $r_{CBP}$   
.....  $A/A_{nt}$

**Bild 6 — Höchstzulässiges Ausgangsdruckverhältnis  $r_{CBP}$ , berechnet mit Gleichung (23)**

Der Isentropenexponent  $\kappa$  braucht nicht genau *bekannt* zu sein, da, Gleichung (23) nur einen Schätzwert liefert und, wie aus Bild 6 hervorgeht, die Empfindlichkeit bezüglich  $\kappa$  gering ist.

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

## 11.2 Für alle Diffusoren bei niedrigen Reynolds-Zahlen

Für alle CFN mit einem Diffusor ist es praktisch unmöglich,  $r_{CBP}$  bei niedrigen Reynolds-Zahlen, z. B. kleiner als  $2 \cdot 10^5$ , vorherzusagen, da das Phänomen der vorzeitigen Entdrosselung (PUP) auftreten kann, das zu einer starken Verringerung des Durchflusskoeffizienten um einen schwer zu beziffernden Betrag führt, siehe 8.1.4 und Anhang H. Bei Verringerung der Reynolds-Zahl 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 sein 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 ausreichend niedrig ist, um von Belang zu sein, sollten die meisten CFNs bei einem Ausgangsdruckverhältnis drosseln, das etwas kleiner als das kritische Druckverhältnis ist (z. B. 0,5, siehe Bild H.1); wenn sich die Reynolds-Zahl jedoch dem unteren Grenzwert dieses Dokument nähert, wird empfohlen, das Ausgangsdruckverhältnis kleiner als 0,25 zu halten (siehe [7] bis [12]).

Wenn genaue Kenntnis des kritischen Ausgangsdruckverhältnisses für den Betrieb des Systems erforderlich ist, wird empfohlen,  $r_{CBP}$  unter Verwendung der gegebenen CFN mit den zugehörigen Einlauf- und Nachlaufleitungen zu messen (siehe Anhang J). Das PUP kann sehr empfindlich sowohl auf die Ausführung der CFN und auch auf ihren Einbauzustand reagieren.

## 11.3 Für CFNs ohne Diffusor oder mit sehr kurzem Diffusor

Für CFNs ohne Diffusor oder mit einem sehr kurzen Diffusor, z. B. mit  $l = 0,1 d_{nt}$ , 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 ein kritisches 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 [41] [44] [46] [48] und muss immer dann berechnet und angegeben werden, wenn vorgesehen ist, eine Messung in Übereinstimmung mit diesem Dokument durchzuführen. Die Messunsicherheit des Massendurchflusses darf in relativen Werten als Prozentsatz, in relativen (dimensionslosen) Werten oder in absoluten Werten mit den gleichen Einheiten wie der jeweilige Massendurchfluss angegeben werden. Die Messunsicherheit darf als Standardunsicherheit  $u$  (mit einem 68 %-Vertrauensniveau), 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 (13) ermittelte Messunsicherheit für den Massendurchfluss wird im einfachsten Fall mit relativen Messunsicherheiten, angegeben in Prozent, ausgedrückt. Die hier angegebenen Größen und Schreibweisen beziehen sich auf relative Messunsicherheiten, die als prozentuale Anteile des Mittelwerts angegeben werden. Messunsicherheitsberechnungen sollten in Übereinstimmung mit ISO/IEC Guide 98-1 [42] [43] durchgeführt werden.

Im Allgemeinen kann die erweiterte Unsicherheit für eine Messgröße aus der kombinierten Standardunsicherheit berechnet werden, die die relative Messunsicherheit vom Typ A umfasst, die mithilfe statistischer Methoden ermittelt wird, und der relativen Messunsicherheit vom Typ B, die mit anderen Methoden ermittelt wird. Beide Verfahren werden durch Bildung der Wurzel aus der Quadratsumme (RSS, en: root-sum-of-squares) wie in Gleichung (24) angegeben kombiniert:

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

Dabei ist  $k$  der Erweiterungsfaktor, wobei  $k = 1$  ein 68 %-Vertrauensniveau angibt und  $k = 2$  in der Regel zur Berechnung der Messunsicherheit mit einem 95 %-Vertrauensniveau geeignet ist. Die Messunsicherheit vom Typ A ist die Standardabweichung der Wiederholungsmessungen des Massendurchflusses aus den Ergebnissen der Wiederholpräzisions- und Vergleichspräzisionsprüfung mit einem 68 %-Vertrauensniveau. Die relative Messunsicherheit vom Typ B ergibt sich aus den Bewertungen der Messunsicherheit der Terme der Gleichung, die zur Berechnung des Massendurchflusses verwendet wird. Es ist üblich und in der Regel praktikabler, Messunsicherheitsberechnungen mithilfe relativer Unsicherheiten durchzuführen, wie in den folgenden praktischen Berechnungsmethoden gezeigt wird. Die Verwendung relativer Unsicherheiten ermöglicht die Verwendung normierter Empfindlichkeitskoeffizienten, die die Exponenten der jeweiligen Faktoren in der Bestimmungsgleichung für die zu bewertende Größe sind.

Die Verwendung des Erweiterungsfaktors  $k = 2$  um ein 95 %-Vertrauensniveau zu erhalten ist angemessen, wenn das System eine große Anzahl an Freiheitsgraden aufweist, was üblicherweise bei Messunsicherheitsbeiträgen vom Typ B angenommen wird. Die Freiheitsgrade für den Beitrag der Messunsicherheit vom Typ A, 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 [47] [49] ermöglicht die Berechnung der effektiven Freiheitsgrade und führt, wenn die Wiederholpräzision (Beitrag vom Typ A) klein ist im Verhältnis zu den Beiträgen vom Typ B, zu einem Erweiterungsfaktor von etwa 2 für ein 95 %-Vertrauensniveau. Für die meisten Anwendungsfälle stellt  $k = 2$  einen annehmbaren Wert dar, um die Messunsicherheiten mit einem 95 %-Vertrauensniveau zu ermitteln.

## 12.2 Praktische Berechnung der Messunsicherheit

Durch Einsetzen von Gleichung (12) in Gleichung (13) ergibt sich die in Gleichung (25) angegebene Bestimmungsgleichung für den Massendurchfluss  $q_m$  einer CFN:

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

Die Messunsicherheit einer Durchflussmessung sollte aus der Standardabweichung der verfügbaren Durchflussmessdaten und den Bewertungen der Messunsicherheit der einzelnen Größen in der Bestimmungsgleichung berechnet werden. In den meisten Fällen kann angenommen werden, dass die Beiträge der Messunsicherheit unabhängig und unkorreliert sind, aber es gibt bestimmte Fälle, in denen korrelierte Messunsicherheiten eine Herausforderung darstellen (siehe 12.3).

Da Gleichung (24) Produkte umfasst, ist es am einfachsten, normierte Empfindlichkeitskoeffizienten und als prozentuale Anteile angegebene relative Messunsicherheiten zu verwenden, (die Unsicherheit bezüglich der geometrischen Formen und Maße geteilt durch den Mittelwert der jeweiligen Komponente). Auf diese Weise sind die Empfindlichkeitskoeffizienten für eine Funktion wie Gleichung (24) die Exponenten der jeweiligen Komponenten. Für den Fall, dass die Beiträge der Messunsicherheit als unabhängig und unkorreliert angenommen werden oder wenn die jeweiligen korrelierten Effekte vernachlässigbar sind, ist Gleichung (26) eine praktikable Arbeitsgleichung zur Berechnung der relativen kombinierten Standardunsicherheit durch Bildung der Wurzel aus der Quadratsumme:

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

wobei die Quadrate Varianzen sind.

Der Term für die relative Messunsicherheit vom Typ A,  $u_A(q_m)$ , kann aus der Standardabweichung der vorliegenden Daten der Wiederholungsmessungen berechnet werden. Die Terme für die relativen Messunsicherheiten vom Typ B in Gleichung (20) können aus der Messunsicherheit jedes Faktors berechnet werden, wobei die absoluten Messunsicherheiten jeder Komponente durch den Betrag dieser Komponente geteilt werden, um die relativen Messunsicherheiten zu bestimmen. Dann werden die Terme für die relativen Messunsicherheiten quadriert und durch Bildung der Wurzel aus der Quadratsumme zusammengeführt.

Jeder Beitrag der Messunsicherheit vom Typ B hat seine eigene Untermenge an Messunsicherheitsquellen. Folgende Beiträge der Messunsicherheit sollten betrachtet werden:

- a) Langzeit-Vergleichspräzision (Drift) des Durchflusskoeffizienten;
- b) Kalibrierung des Druckfühlers;
- c) Kalibrierungen des Temperaturfühlers;
- d) Verschiebungen zwischen regelmäßigen Kalibrierungen;
- e) Temperatureinflüsse auf den Massendurchfluss der CFN, z. B. Wärmeableitung oder Abweichungen bei der Aufnahme der Messwerte;
- 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 und
- k) Druckeinflüsse, z. B. Abweichungen des Werts von  $C^*$ , weil Realgaseinflüsse nicht vollständig erfasst werden (siehe Anhang B).

Ein Beispiel für eine Bewertung der einzelnen Beiträge zur Messunsicherheit ist in Bild 7 dargestellt, das die Beziehung zwischen Messunsicherheiten des Durchmessers (verschiedener Größenordnungen) und des Querschnitts zeigt.

### 12.3 Korrelierte Beiträge der Messunsicherheit

In einigen Messfällen sind die Beiträge der Messunsicherheit nicht vollständig unabhängig bzw. auf eine nicht vernachlässigbare Weise abhängig voneinander. Wenn ein Beitrag in Abhängigkeit vom Wert eines anderen Beitrags variiert, sind sie nicht unabhängig und die Korrelation der Variablen muss berücksichtigt werden.

Für die Messfälle, bei denen die Terme der Bestimmungsgleichung nicht als unabhängig voneinander angenommen werden können und der Grad der Korrelation signifikant ist, werden die Berechnungen etwas komplexer, da Terme für die jeweiligen relativen Korrelationen einbezogen werden sollten. Die Terme für die korrelierten Variablen werden anhand der Daten für die jeweiligen sich gegenseitig beeinflussenden Terme berechnet oder ausgewertet.