

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

Abgasreinigung  
Massenkraftabscheider  
Waste gas cleaning  
Inertial separators

VDI 3676

Ausg. deutsch/englisch  
Issue German/English

*Der Entwurf dieser Richtlinie wurde mit Ankündigung im Bundesanzeiger einem öffentlichen Einspruchsverfahren unterworfen.*

*Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.*

*The draft of this standard has been subject to public scrutiny after announcement in the Bundesanzeiger (Federal Gazette).*

*The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung .....	2	Preliminary note.....	2
Einleitung .....	2	Introduction.....	2
<b>1 Anwendungsbereich</b> .....	<b>6</b>	<b>1 Scope</b> .....	<b>6</b>
<b>2 Begriffe</b> .....	<b>6</b>	<b>2 Terms and definitions</b> .....	<b>6</b>
<b>3 Formelzeichen</b> .....	<b>10</b>	<b>3 Symbols</b> .....	<b>10</b>
<b>4 Physikalische Grundlagen</b> .....	<b>13</b>	<b>4 Physical fundamentals</b> .....	<b>13</b>
4.1 Phasentrennende Kräfte .....	13	4.1 Phase-separating forces .....	13
4.2 Abscheiderprinzipien .....	15	4.2 Separation principles .....	15
4.3 Trenngrad und Gesamtabscheidegrad.....	20	4.3 Grade efficiency and overall collection efficiency.....	20
4.4 Energiebedarf und Druckverlust .....	27	4.4 Energy requirement and pressure drop ....	27
4.5 Anwendungsgrenzen.....	30	4.5 Application limits .....	30
<b>5 Ausführungsarten</b> .....	<b>31</b>	<b>5 Types of inertial separator</b> .....	<b>31</b>
5.1 Schwerkraft-Gegenstromabscheider und Schwerkraft-Querstromabscheider....	31	5.1 Countercurrent-flow and horizontal- flow gravity separators .....	31
5.2 Umlenkabscheider.....	32	5.2 Baffle separators .....	32
5.3 Zyklonabscheider (Fliehkraftabscheider) .....	33	5.3 Cyclone separators (centrifugal separators) .....	33
5.4 Parallelschaltung von Zyklonabscheidern.....	44	5.4 Parallel-connected cyclone separators.....	44
5.5 Reihenschaltung von Zyklonabscheidern.....	47	5.5 Series-connected cyclone separators.....	47
<b>6 Hinweise für die Planung von Massenkraftabscheidern</b> .....	<b>48</b>	<b>6 Planning notes for inertial separators</b> .....	<b>48</b>
6.1 Allgemeine Sicherheitsanforderungen ....	48	6.1 General safety requirements .....	48
6.2 Grundlagen für die Planung der Abscheideanlage als Voraussetzung für die technische Gewährleistung .....	48	6.2 Separator design basis as a prerequisite for the performance guarantee.....	48
6.3 Gewährleistungen für die Wirksamkeit des Abscheiders .....	54	6.3 Guaranteed performance data for the separator.....	54
<b>7 Inbetriebnahme, Betrieb und Instandhaltung</b> .....	<b>55</b>	<b>7 Commissioning, operation and maintenance</b> .....	<b>55</b>
7.1 Allgemeine Hinweise.....	55	7.1 General notes .....	55
7.2 Technische Dokumentation.....	63	7.2 Technical documentation.....	63
Schrifttum .....	69	Bibliography .....	69
Benennungsindex englisch-deutsch.....	72	Term index German-English.....	72

VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss  
Fachbereich Umweltschutztechnik

VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 6: Abgasreinigung – Staubtechnik

## Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

## Einleitung

Partikelabscheider haben die Aufgabe, feste oder flüssige Partikel möglichst vollständig aus Gasen abzutrennen, entweder um Gas vor seiner weiteren Verwendung von Partikeln abzureinigen oder um ein Produkt aus einem Gasstrom zu gewinnen und es weiterverarbeiten zu können. Bild 1 zeigt schematisch den Abscheideprozess mit den beteiligten Stoffströmen und ihren für die Abscheidung relevanten physikalischen Kenngrößen. Analog zur Trennung einer Feststoffschüttung durch ein Sieb in einen Grobgutanteil (Rückstand auf dem Sieb) und einen Feingutanteil (Durchgang durch das Sieb) wird das dem Abscheider mit dem Gasstrom zugeführte sogenannte Aufgabegut in zwei Anteile aufgespalten, das abgeschiedene Produkt, Grobgut genannt, und das nicht abgeschiedene Produkt, Feingut genannt. Das Feingut verlässt den Abscheider zusammen mit dem Gasstrom. Das Grobgut wird in der Regel ohne Gas abgezogen und mit einem Austragsorgan der weiteren Verarbeitung oder Speicherung zugeführt. Beim Sieben bestimmt die Siebmaschenweite als Apparateeigenschaft und die Feinheit des Aufgabeguts als Produkteigenschaft das Trennergebnis, das heißt das Verhältnis von Feingutmenge zu Grobgutmenge. Analog dazu bestimmt beim Abscheideprozess die Trenngradkurve  $T(x)$ , die eine Funktion der Partikelgröße  $x$  ist und durch die Konstruktion und die Betriebsdaten des Trennapparats bestimmt ist (siehe Abschnitt 4.3), und die Feinheit des Aufgabeguts das Trennergebnis. Die Feinheit des Aufgabeguts wird quantitativ durch die Partikelgrößenverteilung  $q_{3,A}(x)$  erfasst (Definition der Partikelgrößenverteilung siehe Abschnitt 4.3). Ein weiteres Ergebnis der Trennung sind die Partikelgrößenverteilungen des Grobguts  $q_{3,G}(x)$  und des Feinguts  $q_{3,F}(x)$ . Bei Abscheideprozessen, in denen die Anzahl der Partikel (nicht deren Masse) relevant ist,

## Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

## Introduction

Particle separators have the function of removing solid or liquid particles as completely as possible from gas streams either to free the gas from particles prior to its further use or to recover a product from the gas stream for further processing. Figure 1 shows a schematic representation of the separation process together with the material flows involved and their physical characteristics of relevance to the gas-solids separation process. Adapted from the separation of bulk solids into a coarse fraction (oversize remaining on the screen) and a fine fraction (undersize passing through the screen), the particle feed entering the separator together with the gas stream is separated into two fractions: the separated product, referred to as coarse fraction, and the product not retained, referred to as fine fraction. The fine fraction leaves the separator together with the gas stream. The coarse fraction is typically discharged from the separator without gas and transferred to further processing or storage by a discharge system. In screening operations, the mesh size of the screen (machine characteristic) and the fineness of the feed (product characteristic) determine the separation result, i.e. the ratio of the amount of fine material to the amount of coarse material. In analogy, the separation result in gas-solids separation processes is determined by the fractional efficiency curve  $T(x)$ , which is a function of the particle size  $x$ , the design and operating data of the separator (see Section 4.3) and the fineness of the particle feed. The fineness of the feed is quantitatively captured by the particle size distribution  $q_{3,A}(x)$  (see definition in Section 4.3). Another result of the separation process are the particle size distributions of the coarse fraction  $q_{3,G}(x)$  and the fine fraction  $q_{3,F}(x)$ . In separation processes where the number of particles (rather than their mass) is of interest,

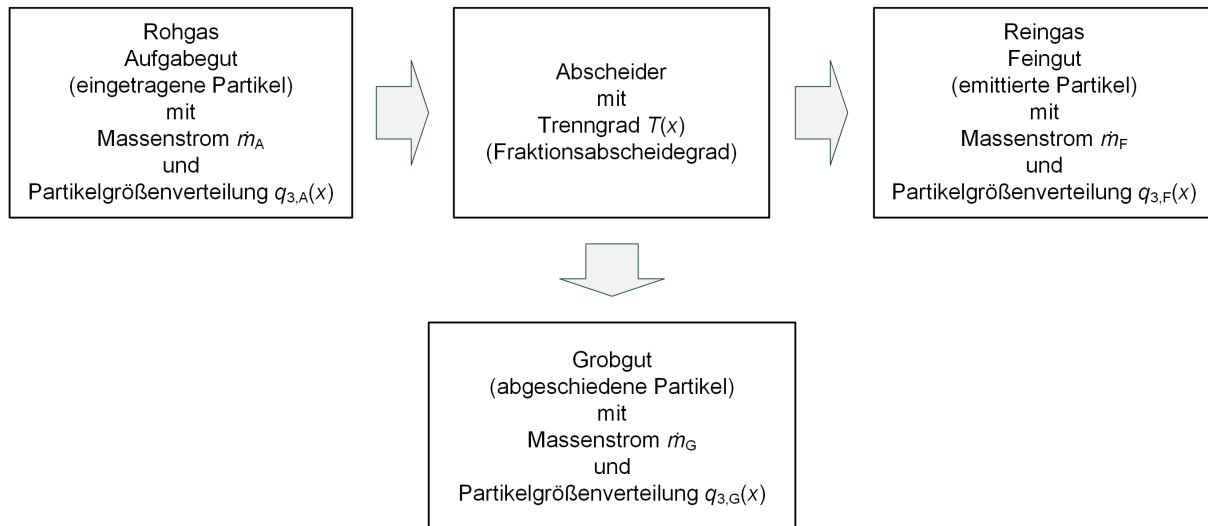


Bild 1. Schematische Darstellung des Abscheideprozesses

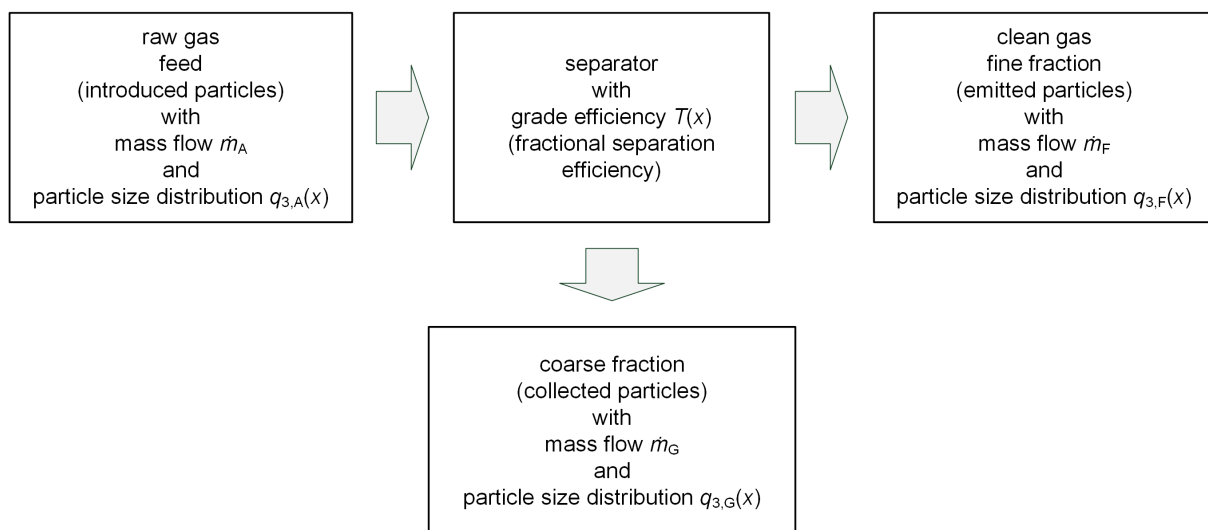


Figure 1. Schematic representation of the separation process

werden anstelle der auf die Mengengart Masse bezogenen Größen  $\dot{m}$  und  $q_3(x)$  häufig der Anzahlstrom und die auf die Mengengart Anzahl bezogene Partikelgrößenverteilung  $q_0(x)$  angegeben ( $x$  ist die Partikelgröße). Der Trenngrad  $T(x)$  des Abscheiders ist unabhängig von der verwendeten Mengengart. In dieser Richtlinie wird die Partikelgrößenverteilung hauptsächlich auf die Mengengart Masse bezogen.

Massenkraftabscheider zählen neben filternden Abscheidern (siehe VDI 3677 Blatt 1 und Blatt 2), elektrostatischen Abscheidern (siehe VDI 3678 Blatt 1 und Blatt 2) und Nassabscheidern (siehe VDI 3679 Blatt 1 bis Blatt 3) zu den am häufigsten eingesetzten Apparaten zur Abtrennung von Partikeln (fest oder flüssig) aus Gasen. Sie werden seit über 100 Jahren in den unterschiedlichsten Bereichen der Industrie eingesetzt. Massenkraftabscheider nutzen die an der Masse eines Partikels angreifende Schwerkraft (Sedimentationsabscheider) oder die durch Umlenkung des Gasstroms erzeugte

the number flow rate and number-based particle size distribution  $q_0(x)$  ( $x$  is the particle size) are frequently indicated instead of the mass-related variables  $\dot{m}$  and  $q_3(x)$ . The separation efficiency  $T(x)$  of the separator is independent of the selected quantification basis. In this standard, the particle size distribution is generally expressed on a mass basis.

Along with filtering separators (see VDI 3677 Part 1 and Part 2), electrostatic precipitators (see VDI 3678 Part 1 and Part 2) and wet separators (see VDI 3679 Part 1 to Part 3), inertial separators count among the most frequently employed equipment for the separation of (solid or liquid) particles from gas streams. Inertial separators have been used in the most diverse industries for more than 100 years. They make use of the gravity force acting on the mass of a particle (gravity separators) or the centrifugal force generated by the deflection of the gas stream (baffle separators, cyclone separa-

Fliehkraft (Umlenkabscheider, Zyklonabscheider), um Partikel aus einem Gasstrom abzutrennen. Massenkraftabscheider haben gegenüber den anderen genannten Abscheideverfahren folgende wesentliche Vorteile:

- Möglichkeit der Weiterverwendung/Verwertung des abgeschiedenen Produkts
- robuste und einfache Bauweise und daraus resultierende hohe Verfügbarkeit
- vergleichsweise geringe Investitions- und Betriebskosten
- Einsetzbarkeit auch bei extremen Betriebsbedingungen (insbesondere bei sehr hohen Partikelbelastungen, z.B. 30 kg Staub je kg Gas, hohen Temperaturen, z.B. 1200 °C, und hohen Drücken, z.B. 100 MPa)
- Abhängigkeit der Abscheidewirkung ausschließlich von der Partikelgröße, der Partikelform und der Partikeldichte, nicht von anderen Partikeleigenschaften wie dem Aggregatzustand (bei filternden Abscheidern) oder dem elektrischen Widerstand des Materials (bei elektrostatischen Abscheidern)

Massenkraftabscheider kommen in unterschiedlichsten Baugrößen, mit Abmessungen zwischen wenigen mm für sehr kleine Gasvolumenströme (z.B. in Ansaugsystemen für Verbrennungsmotoren) und etwa 10 m für sehr große Gasvolumenströme (z.B. in Kraftwerken), zum Einsatz.

Sedimentationsabscheider werden nur als Vorabscheider für relative grobe Partikel ( $> 10 \mu\text{m}$ ) eingesetzt. Zentrifugalabscheider wie der Umlenkabscheider mit U-förmiger Strömungsführung oder der noch effizientere Zyklonabscheider nutzen die Fliehkraft als Massenkraft. Diese übersteigt die im Sedimentationsabscheider wirkende Schwerkraft um ein Vielfaches und führt daher zu deutlich höheren Abscheideleistungen.

Der Hauptnachteil von Massenkraftabscheidern gegenüber den anderen Abscheideverfahren ist die vergleichsweise geringe Abscheidewirkung bei sehr kleinen Partikelgrößen im Bereich weniger  $\mu\text{m}$ . Sie hängt im Wesentlichen von der Baugröße und damit vom abzureinigenden Volumenstrom ab. Je kleiner der Volumenstrom, desto besser lassen sich auch sehr feine Partikel mit Massenkraftabscheidern abreinigen. Bei sehr kleinen Volumenströmen im Bereich von 10  $\ell/\text{s}$  bis 100  $\ell/\text{s}$  lassen sich mit mehreren parallelgeschalteten kleinen Zyklonzellen auch Partikel mit Partikelgrößen von 1  $\mu\text{m}$  noch zu etwa 50 % abscheiden. Bei höheren Volumenströmen von mehreren 10000  $\text{m}^3/\text{h}$  bis zu 1000000  $\text{m}^3/\text{h}$  verschiebt sich diese Grenze zu

tors) to collect particles from a gas stream. Compared to the other separator types mentioned above, inertial separators offer the following main advantages:

- possibility of reusing/recovering the separated product
- robust and simple design and thus high availability
- relatively low capital and operating costs
- ability to operate in extreme operating conditions (in particular very high particle loadings, e.g. 30 kg dust per kg gas, high temperatures, e.g. 1200 °C, and high pressures, e.g. 100 MPa)
- the separation effect is solely a function of the particle size, particle shape and particle density; other particle properties like the physical state (in filtering separators) or the electrical resistivity of the material (in electrostatic precipitators) play no role.

Inertial separators are available in the most diverse sizes with dimensions ranging from a few mm for very small gas flow rates (e.g. in aspiration systems of combustion engines) to roughly 10 m for very high gas flow rates (e.g. in power plants).

Gravity separators are only used as pre-separators for relatively coarse particles ( $> 10 \mu\text{m}$ ). Centrifugal separators, such as the baffle separator with a U-shaped gas flow or the even more efficient cyclone separator, use the centrifugal force as inertial force. The centrifugal force is multiple times higher than the gravity force active in gravity separators, leading to significantly higher collection efficiencies.

A major drawback of inertial separators as compared to other separation processes is the relatively poor collection efficiency for very small particle sizes in the range of a few  $\mu\text{m}$ . The collection efficiency is mainly governed by the size of the separator and hence the flow rate of the gas to be cleaned. The smaller the gas flow rate, the better is the collection efficiency of inertial separators for very small particles. At very small gas flow rates in the range of 10  $\ell/\text{s}$  to 100  $\ell/\text{s}$ , particles sized 1  $\mu\text{m}$  can be removed with 50 % efficiency when connecting several small cyclone cells in parallel. At higher gas flow rates of several 10000  $\text{m}^3/\text{h}$  up to 1000000  $\text{m}^3/\text{h}$ , there is a shift in the cut size to values between 5  $\mu\text{m}$  and 30  $\mu\text{m}$ . The above values

Werten zwischen 5 µm und 30 µm. Die genannten Werte gelten für Partikeldichten zwischen 1000 kg/m<sup>3</sup> und 3000 kg/m<sup>3</sup>. Für höhere oder geringere Partikeldichten verschieben sich die Grenzen zu kleineren oder höheren Werten hin. Beispielsweise korrespondieren die genannten Grenzen bei kompakten Stahlpartikeln (Dichte ca. 7000 kg/m<sup>3</sup>) zu 0,6 µm (Volumenströme 10 l/s bis 100 l/s) und 3 µm bis 20 µm (Volumenströme von mehreren 10000 m<sup>3</sup>/h bis zu 1000000 m<sup>3</sup>/h).

Die mit Massenkraftabscheidern erreichbaren Partikelemissionen hängen aufgrund des zugrunde liegenden Abscheideprinzips ganz entscheidend von den Eigenschaften des abzuschheidenden Produkts ab, in erster Linie von dessen Feinheit und Konzentration im Rohgas. Ohne Kenntnis dieser Daten ist selbst eine nur grobe Abschätzung der erreichbaren Partikelemission nicht möglich.

In vielen Fällen werden Massenkraftabscheider als Vorabscheider zur Abtrennung eines Großteils der Partikelbelastung vom Gasstrom eingesetzt, um nachgeschaltete Abscheider, in der Regel filternde oder elektrostatische Abscheider oder Nassabscheider, zu entlasten. Anwendungsbeispiele sind Zykclone in Kraftwerken mit zirkulierender Wirbelschichtfeuerung zur Energieerzeugung oder Zykclonekaskaden in Trocknungsanlagen der Zementindustrie. Es gibt aber auch viele Anwendungen, in denen das Aufgabegut hinreichend grob und seine Konzentration im Rohgas klein genug sind, um Massenkraftabscheider als Endabscheider einsetzen zu können, die die von Behörden vorgeschriebenen Grenzwerte für Partikelemissionen einhalten. Beispiele hierfür sind Spänezyklone in der Holzverarbeitungsindustrie, Zykclone als Tropfenabscheider hinter Nassabscheidern (VDI 3679 Blatt 3) oder Umlenkabscheider im Kopf von Absorptionskolonnen.

Folgende VDI-Richtlinien beschäftigen sich ebenfalls mit Partikelabscheidung:

- VDI 3677 Blatt 1 Filternde Abscheider; Oberflächenfilter
- VDI 3677 Blatt 2 Filternde Abscheider; Tiefenfilter
- VDI 3677 Blatt 3 Filternde Abscheider; Heißgasfiltration
- VDI 3678 Blatt 1 Elektrofilter; Prozess- und Abgasreinigung
- VDI 3678 Blatt 2 Elektrofilter; Prozessluft- und Raumluftreinigung
- VDI 3679 Blatt 1 Nassabscheider; Grundlagen, Abgasreinigung von partikelförmigen Stoffen
- VDI 3679 Blatt 3 Nassabscheider; Tropfenabscheider

relate to particle densities of 1000 kg/m<sup>3</sup> to 3000 kg/m<sup>3</sup>. For higher and lower particle densities, the cut size shifts to smaller and higher values respectively. With compact steel particles (density approx. 7000 kg/m<sup>3</sup>), for instance, the above cut sizes correspond to 0,6 µm (for flow rates of 10 l/s to 100 l/s) and 3 µm to 20 µm (for flow rates of several 10000 m<sup>3</sup>/h up to 1000000 m<sup>3</sup>/h).

Due to the underlying separation principle, the particle emission attainable by inertial separators is critically dependent on the characteristics of the product to be separated, primarily its fineness and its concentration in the raw gas. Without the knowledge of these data, it is not possible to even make a rough estimate of the achievable particle emission.

In many cases inertial separators are used as pre-separators to remove the bulk of the particle loading from the gas stream and thus reduce the load on the downstream final separators, normally a filtering separator or an electrostatic precipitator or a wet separator. Application examples are cyclones in circulating fluidised-bed steam generators for energy generation or multi-stage cyclone systems in drying plants in the cement industry. There are, however, also many applications where the particle feed is sufficiently coarse and its concentration in the raw gas small enough for inertial separators to be used as a final control device to meet the prescribed regulatory particle emission limits. Examples are chip cyclones in the wood processing industry, centrifugal mist eliminators downstream of wet separators (VDI 3679 Part 3) or baffle mist eliminators in the head space of absorption columns.

Further VDI Standards dealing with particle collection from gas streams are:

- VDI 3677 Part 1 Filtering separators; Surface filters
- VDI 3677 Part 2 Filtering separators; Depth fiber filters
- VDI 3677 Part 3 Filtering-separators; High-temperature gas filtration
- VDI 3678 Part 1 Electrostatic precipitators; Process and waste gas cleaning
- VDI 3678 Part 2 Electrostatic precipitators; Process air and indoor air cleaning
- VDI 3679 Part 1 Wet separators; Fundamentals, waste gas cleaning of particle collections
- VDI 3679 Part 3 Wet separators; Mist eliminators

## **1 Anwendungsbereich**

Diese Richtlinie beschreibt den Stand der Technik von Anlagen zur Abscheidung von Partikeln durch Massenkräfte, sogenannte Massenkraftabscheider.

## **1 Scope**

This VDI Standard describes the state of the art of systems exploiting inertial forces for particle collection from gas streams, so-called inertial separators.