

Experimente zur Feinstaubabscheidung im Hochleistungs-Venturiwäscher mit mehrstufigen Eindüsen der Waschflüssigkeit

Experiments with highly efficient Venturi scrubbers for aerosol separation from gases under multi-plane water injection

von KLAUS-DIETER TIGGES

Institut für Verfahrenstechnik, Universität Hannover, Callinstr. 36, 3000 Hannover 1 (B.R.D.)

und FRANZ MAYINGER

Lehrstuhl A für Thermodynamik, Universität München, Arcisstr. 21, 8000 München 2 (B.R.D.)

(Eingegangen am 30. November 1983)

Zusammenfassung

Venturiwäscher erreichen hohe Abscheidegrade auch für Partikeln mit sehr geringem Durchmesser. Wesentlicher Nachteil der bisher eingesetzten einstufigen Bauart ist jedoch der hohe Druckverlust des Gasstromes. Durch mehrstufiges Eindüsen der Waschflüssigkeit gelingt es, nicht nur das Abscheidevermögen zu erhöhen, sondern auch den Energieaufwand erheblich zu senken.

Abstract

Venturi scrubbers achieve very high separating efficiencies also for particles with very small diameters. An essential draw-back of the design used up to now with single-plane washing-liquid injection, however, is the high pressure loss of the gas flow with respect to the cleaning efficiency. By injecting the washing liquid in several planes it is possible not only to improve the cleaning efficiency but also to reduce considerably the energy consumption of the apparatus.

Synopsis

Frequently, Venturi scrubbers are used for removing very small dust particles or aerosols from exhaust gases. The design and working principle of a Venturi scrubber is shown in Fig. 1. The exhaust gas carrying dust is accelerated in the converging part of the nozzle to velocities up to 120 m s^{-1} . After this acceleration, water or another washing liquid is injected perpendicular to the flow direction of the gas in the so-called throat. Here the cleaning process takes place. Behind the throat the gas-liquid mixture is decelerated again in the diffuser.

The energy necessary for cleaning the exhaust gas has to be applied by a blower or compressor to the gas. For separating very tiny dust particles high pressure—more than 300 mbar—is needed.

In the literature it is often assumed that the washing liquid is dispersed into droplets in the throat (Fig. 2). Neumann [7] and also Roberts and Hill [8] showed that the liquid at first is fragmented in very small lamellar-like sheets due to high shear stress forces and that only later on, at the end of the throat, droplets are forming. The lamellar structure of the liquid-gas mixture guarantees a high separation efficiency.

Experiments were performed to determine how by influencing the formation of the gas-liquid mixture the cleaning efficiency and energy consumption of the scrubber could be improved. The test facility for these experiments is shown in Fig. 3. For charging gas with very small particles and aerosols a welding process was used, which produced spherical particles with a very smooth surface of diameters between 0.1 and $6 \mu\text{m}$ (Fig. 4).

Special attention was paid to measuring the spread of the particle diameter (Fig. 5) and the density of the particles. An aerosol counter was used to specify the particles and a pycnometer to measure the density. The aerosol counter works according to the principle of light dispersion. The particle size distribution as produced in the welding process is shown in Fig. 6. The mean particle diameter is $0.29 \mu\text{m}$.

Having available information about the fluid dynamic phenomena in the throat of the Venturi scrubber from former experiments [7], the simple idea came up to improve the scrubber behaviour by adding the washing liquid in several injection layers instead of in one, as is usual with Venturi scrubbers. As is well-known from the literature, the cleaning efficiency (eqns. (1) and (2))

improves with the amount of liquid added per cubic meter of gas and with increasing gas velocity in the throat. Figure 7 gives the relationship between liquid added—in liters per cubic meter—and gas velocity for the tested scrubber, if all the washing liquid is injected in one plane. The situation improves if one injects the same amount of water in two planes instead of in one (Fig. 8). The increase in separation efficiency is higher at large amounts of liquid injected and at medium and high gas velocities. The main benefit of injecting the washing liquid in more than one plane, however, lies in the lower energy consumption (Figs. 9 and 10) for equal separation efficiencies.

By injecting the water at four planes, a separation efficiency of 90 to 95% can be reached at pressure losses which are lower by a factor of 3 compared with adding the water in one plane. If separation efficiencies higher than 95% are needed, water injection in several planes is even more recommendable (Fig. 10).

The superiority of multi-plane injection is even more significant if one looks at the fractional separation efficiency (eqns. (2) and (3)). With single-plane water injection, particles smaller than $0.2 \mu\text{m}$ can only be separated satisfactorily with high gas velocities and large amounts of water (Fig. 11). This results in a large drop in pressure. With four-plane injection, particles as small as $0.05 \mu\text{m}$ can be separated with an efficiency of 50% at a gas velocity of only 80 m s^{-1} , as is shown in Fig. 12. This Figure also demonstrates that the near-mesh diameter of the particles decreases considerably when increasing the number of water injection planes. Therefore, injecting water in several layers instead of in one, is an efficient improvement in the design of Venturi scrubbers.

1. Einführung

Nassentstauber zum Abscheiden von Feinstäuben und Aerosolen sind in der Technik der Abluftreinigung häufig eingesetzte Apparate. Zum Abscheiden kleinster Partikeln im submikronen Grössenbereich hat sich in besonderem Masse der Hochleistungs-Venturiwäscher u.a. aufgrund seines geringen Grenzkorndurchmessers durchgesetzt. Weitere Vorteile dieser Wäscherbauart sind die geringen Investitions- und Wartungskosten. Letztere resultieren aus der hohen Betriebssicherheit, die solche Anlagen bieten.

Das Prinzip eines Venturiwäschers zeigt Bild 1.

Die Apparatur besteht aus einem konvergenten Teil, (auch mit "Konfusor" bezeichnet) einer sogenannten Kehle und einem Diffusor. Das eintretende, staubbeladene Gas wird in dem konvergenten Teil beschleunigt und erreicht in dem engsten Querschnitt des Wäschers, der Kehle, seine höchste Geschwindigkeit. Diese Gasgeschwindigkeit kann bis zu 120 m s^{-1} betragen. In der Kehle wird das Washwasser meist senkrecht zur Strömungsrichtung des Gases eingedüst und durch sehr grosse Scherspannungs- und Impulskräfte, die der Gasstrom auf die Flüssigkeit ausübt, äusserst fein zerteilt. Die so gebildete Austauschfläche ermöglicht die Anlagerung der abzuscheidenden Feststoffe an die Waschflüssigkeitsteilchen.

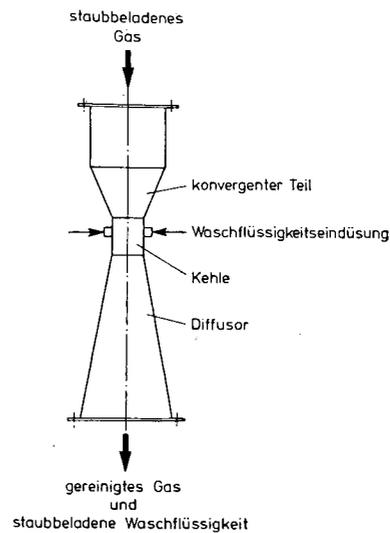


Bild 1. Prinzipskizze eines Venturiwäschers.

Fig. 1. Principle of a Venturi scrubber.

Der Diffusor besorgt eine Verzögerung des Zweiphasengemisches und somit einen teilweisen Druckrückgewinn aus der kinetischen Energie des Fluids. Ein nachgeschalteter Flüssigkeitsabscheider trennt das den Diffusor verlassende Gemisch aus gereinigtem Gasstrom und nunmehr staubbeladener Waschflüssigkeit.

Die erforderliche Energie für die Entstaubung wird von der Gasseite aufgebracht, was sich in einem bleibenden statischen Druckabfall über den Wäscher äussert. Dieser Druckabfall erreicht vor allem zum Abscheiden kleinster Partikeln sehr hohe Werte, z.B. über 300 mbar, weil in diesem Fall die Gasgeschwindigkeit in der Kehle und der eingesetzte Wasservolumenstrom sehr gross sein müssen.

Für die Auslegung von Venturianlagen ist es daher erforderlich, durch konstruktive Massnahmen den für einen bestimmten Entstaubungsgrad "erforderlichen" gaseitigen Druckverlust zu minimieren. Dies ist allerdings eine Aufgabe, die sich nur auf experimentellem Wege lösen lässt, weil ein Berechnungsmodell, das die Staubabscheidung im Venturiwäscher hinreichend genau beschreibt, bisher nicht existiert.

2. Mechanismus der Entstaubung

Die Staubabscheidung in einem Venturiwäscher besteht aus 3 Schritten:

1. Anlagerung der Staubpartikel an die Waschflüssigkeitsteilchen
2. Bindung der beiden und schliesslich der
3. Separation von gasförmiger und flüssiger Phase.

Das Anhaften der Staubteilchen an die Waschflüssigkeit ist nach einmaliger Berührung entsprechend den Untersuchungen von Weber [1] und Schuch [2] bereits gesichert. Die Separation von gasförmiger und flüssiger Phase ist leicht in herkömmlichen Flüssigkeitsabscheidern möglich. Das wesentliche Problem der Entstaubung ist also das Heranführen der abzuscheidenden Feststoffe an die Waschflüssigkeit. In dem Venturiwäscher geschieht

dies hauptsächlich aufgrund der Massenträgheit der Staubpartikel [3–5]. Zur theoretischen Beschreibung dieses Effekts, der auch mit Stossabscheidung bezeichnet wird, wurde von Sell bereits 1931 das sogenannte Tropfenmodell entwickelt [6]. Bild 2 veranschaulicht das Tropfenmodell.

Es beruht auf der Annahme, dass die Waschflüssigkeit nach der Eindüsung sofort in Tropfenform vorliegt—hier dargestellt als Einzeltropfen. Dieser Tropfen wird von dem staubbeladenen Gas mit der Relativgeschwindigkeit w_R umströmt. Die Staubteilchen weichen in der Nähe des Tropfens von den sich krümmenden Gasstromlinien ab und prallen auf den Tropfen, sofern sie sich auf Stromlinien bewegen, die innerhalb der sogenannten Grenzstaubbahnen liegen. Dies sind die Staubbahnen, die den Tropfen gerade noch berühren.

Die Annahme, dass die Flüssigkeit sofort nach der Eindüsung in Tropfen zerfällt und diese für den Abscheidemechanismus wirksam werden, ist jedoch nicht gerechtfertigt. Neumann [7] zeigte dies mit Hilfe der Ultrakurzzeitfotographie. Er stellte fest, dass die Flüssigkeit zunächst in Lamellen und Membranen mit grossen Phasengrenzflächen zerfällt, was in einer neueren Untersuchung von Roberts und Hill [8] bestätigt wurde. Erst später, nachdem die Abscheidung bereits weitgehend erfolgt ist, bilden sich diese Flüssigkeitsgebilde zu Tropfen zurück.

Obwohl die Voraussetzungen des Tropfenmodells nicht erfüllt sind, lässt sich doch der Mechanismus der Stossabscheidung qualitativ mit dieser Modellvorstellung beschreiben. Dazu sei einmal angenommen, dass der Tropfendurchmesser aus Bild 2 die für die Entstaubung äquivalente Abmessung eines beliebig geformten Flüssigkeitsteilchens, z.B. einer Membran wie Neuman und Roberts und Hill sie fanden, ist. Die Einflussgrössen für die Stossabscheidung lassen sich dann folgendermassen zusammenfassen:

- aerodynamischer Partikeldurchmesser
- Dichte der Staubteilchen
- Flüssigkeitsteilchengrösse
- Anzahl der Flüssigkeitsteilchen
- Relativgeschwindigkeit zwischen Gas und Flüssigkeit

Wesentliche Einflussgrösse für die Entstaubung ist die Massenträgheit der Partikeln. Durchmesser und Dichte der Partikeln sowie ihre Geschwindigkeit relativ zum Abscheidkörper sind daher von Bedeutung. Die Staubteilchen können der Flüssigkeit auf ihrem Weg durch den Wäscher umso schlechter ausweichen, je grösser die gesamte Oberfläche der Waschflüssigkeit in

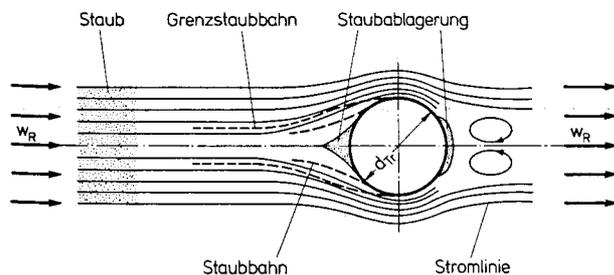


Bild 2. Tropfenmodell.

Fig. 2. Model of dust separation with liquid droplets.

der Venturikehle ist. Diese ist von Anzahl und Grösse der Flüssigkeitspartikeln abhängig.

Das Entstaubungsverhalten kann also für eine gegebene Staubfraktion nur durch die Flüssigkeitsoberfläche und durch die Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen beeinflusst werden. Als wirksame Phasengrenzfläche wird die auch für den Stoffübergang wirksame angenommen.

Im Rahmen dieses Beitrages soll von Entstaubungsversuchen berichtet werden, in denen die Flüssigkeitsoberfläche durch konstruktive Massnahmen an der Waschflüssigkeitszufuhr erhöht wird, damit sich ein geforderter Entstaubungsgrad mit geringerem gaseitigen Druckverlust erzielen lässt.

3. Versuchsanlage

Die für diese Experimente verwendete Versuchseinrichtung ist in Bild 3 schematisch dargestellt.

Das Rootsgebläse (15) saugt Luft von ausserhalb der Versuchshalle durch den Filter (1) und das Regelventil (2) an. In der anschliessenden Normblende (3) erfolgt die Massenstrommessung nach DIN 1952. Die Schweissvorrichtung (4) ist eine vollautomatisch arbeitende, elektronisch geregelte Schweissmaschine. Sie erzeugt Schweissrauch durch Abbrennen einer endlosen Fülldrahtelektrode. Die Kammer, in der dieser Schweissprozess abläuft, ist gasdicht. Die gefilterte Umgebungsluft strömt ihr von unten zu, wird mit den Schweissrauchteilchen beladen, oben abgezogen und dem Hochleistungs-Venturiwäscher (5) zugeführt. Dieser Hochleistungs-Venturiwäscher ist ausgelegt für einen Gasvolumenstrom von $200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Der Konfusor hat einen

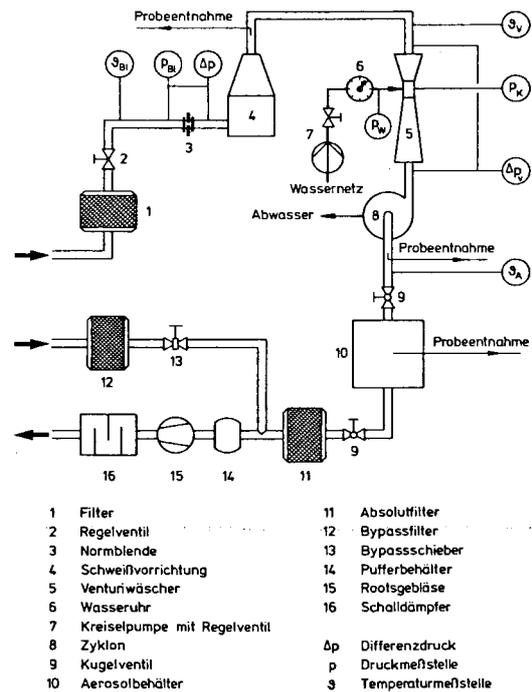


Bild 3. Schema der Versuchsanlage.

Fig. 3. Schematic view of the test facility.

Öffnungswinkel von 25° und erfüllt gleichzeitig die Funktion des Übergangsteils von dem kreisförmigen Rohrquerschnitt auf den quadratischen Kehlenquerschnitt. Diese Querschnittsfläche der Kehle beträgt $22 \times 22 \text{ mm}^2$. Das Eindüsen der Waschflüssigkeit geschieht über in zwei gegenüberliegenden Seiten angeordneten Düsenleisten durch einfache gerade Bohrungen quer zum Gasstrom. Die Waschflüssigkeit wird mittels einer Kreiselpumpe (7) direkt dem Wasserleitungsnetz entnommen.

Um die Untersuchung mehrstufiger Wassereindüsung zu gestatten, sind zwei Düsenleisten übereinander angeordnet. Der axiale Abstand beträgt 40 mm, weil aus den Untersuchungen von Neumann [7] hervorging, dass nach diesem Strömungsweg etwa 80% der Stoffaustauschfläche vorliegt, die von der ersten Eindüsungsstufe gebildet werden kann. Durch Hintereinanderschalten mehrerer baugleicher Venturikehlen besteht die Möglichkeit, das Waschwasser in beliebig vielen Ebenen einzudüsen.

Der Diffusor hat einen Öffnungswinkel von 7° , der bei minimaler Baulänge den grösst möglichen Druckrückgewinn gewährleistet. Der Zyklon (8) trennt das den Diffusor verlassende feststoffbeladene Waschwasser wieder von der gereinigten Luft. Die nicht abgeschiedenen Partikel gelangen zunächst in den Aerosolbehälter (10), danach in den Absolutfilter (11), der das Rootsgebläse vor diesen Staubteilchen schützt. Der zusätzlich angesaugte Bypassstrom ermöglicht die Feinregulierung des Luftvolumenstroms.

Der Pufferbehälter (14) und der Absorptionsschalldämpfer (16) sorgen für eine geeignete Verringerung des Schallpegels, der von dem Rootsgebläse emittiert wird. Die Temperaturen werden mit Flüssigkeitsthermometern, die Drücke von mit Wasser bzw. Quecksilber gefüllten U-Rohren gemessen. Der zugeführte Wasservolumenstrom geht aus einer Volumen-Zeit-Messung an einer Wasseruhr hervor.

4. Partikelmesstechnik

Zur Bestimmung der Entstaubungsgrade können an 3 Stellen Proben des Rauchaerosols entnommen werden. Die Probeentnahme aus dem Aerosolbehälter (10) dient der Messung von Entstaubungsgraden als Funktion der Rauchteilchengrösse. Solche Entstaubungsgrade werden als Fraktionsabscheidegrade bezeichnet. Zunächst sollen die beiden übrigen Probeentnahmestellen betrachtet werden: direkt hinter der Schweissapparatur und hinter dem Zyklon werden während des Versuchs zeitgleich Teilströme abgesaugt, um an diesen Orten die Staubmassenströme in der Rohrleitung zu bestimmen. Aus diesen beiden Messgrössen lässt sich der sogenannte Gesamtabscheidegrad ermitteln.

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{\dot{M}_{\text{St},1} - \dot{M}_{\text{St},2}}{\dot{M}_{\text{St},1}} \quad (1)$$

Er ist das Verhältnis der im Wäscher abgeschiedenen zu der ihm zugeführten Staubmasse und wird berechnet aus dem Staubmassenstrom vor ($\dot{M}_{\text{St},1}$) und hinter dem Wäscher ($\dot{M}_{\text{St},2}$). Gemessen werden diese Staubmassenströme auf gravimetrischem Wege. Zur Erläuterung

dieses Messverfahrens sei auf die gängige Literatur z.B. [9–13] verwiesen.

Der Gesamtabscheidegrad macht allerdings über die Abhängigkeit des Entstaubungsgrades von der Partikelgrösse keine Aussage. Er erfasst vielmehr nur die integrale Veränderung des Staubmassenstroms. In welcher Weise der Abscheidegrad eines Entstaubers—hier der Venturiwäscher—von der Korngrösse des abzuscheidenden Aerosols abhängt, lässt sich allein aus dem Fraktionsabscheidegrad erkennen.

Zur experimentellen Ermittlung dieses Fraktionsabscheidegrades muss die Korngrößenverteilung des Rauchaerosols vor und hinter der Reinigungsanlage gemessen werden. Zu diesem Zweck wurde ein Partikelgrössenanalysator der Fa. ROYCO, Typ LAS 226 eingesetzt, der nach dem in der Praxis vielfach verwendeten Streulichtprinzip arbeitet. Er bietet den Vorteil der sehr kurzen Analysendauer und die Möglichkeit, noch Teilchengrössen von $0,1 \mu\text{m}$ Durchmesser zu erfassen. Der grösste noch messbare Partikeldurchmesser liegt bei $6,1 \mu\text{m}$. Derartige Messsysteme schliessen von der Intensität des an einer Einzelpartikel gestreuten Lichtes auf die Partikelgrösse [14, 15] und liefern als Messergebnis die Anzahl der in verschiedenen Partikelgrössenbereichen, sogenannten Kanälen, gefundenen Partikeln. Jeder dieser Kanäle wird gekennzeichnet durch eine Teilchengrösse, die dem Äquivalentdurchmesser einer Kugel entspricht. Diese Kugel hat die gleiche Projektionsfläche wie das untersuchte Teilchen. Die zu untersuchenden Teilchen sind Schweissrauchteilchen. Sie zeichnen sich wie Bild 4 zeigt durch eine kugelförmige Gestalt mit sehr glatter Oberfläche aus.

Aus den Teilchenzahlen in den verschiedenen Durchmesserbereichen kann die gesuchte Korngrößenverteilung berechnet werden und zwar in Form einer Massen- bzw.

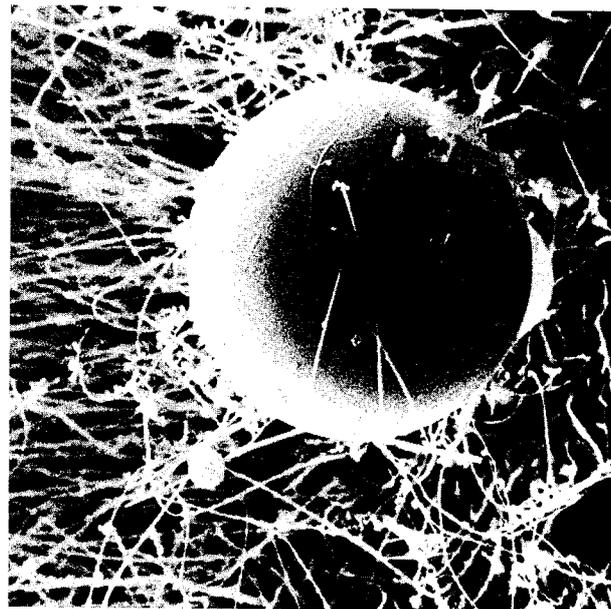


Bild 4. Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines Schweissrauchteilchens.

Fig. 4. Micrograph of a welding smoke particle taken with a raster electronic microscope.

Volumenverteilungssummenkurve. Eine solche Kurve gibt an, welcher Massenanteil des Schweißrauchs durch Teilchen kleiner und gleich einem bestimmten Durchmesser gebildet wird. Der gesuchte Fraktionsabscheidegrad η_F für eine bestimmte Teilchengröße d_T , $\eta_F(d_T)$, ist nun das Verhältnis der im Wäscher abgeschiedenen zur zugeführten Staubmasse, die durch Teilchen mit diesem Durchmesser d_T gebildet wird.

$$\eta_F(d_T) = \frac{\dot{M}_{St,1}(d_T) - \dot{M}_{St,2}(d_T)}{\dot{M}_{St,1}(d_T)} \quad (2)$$

Die Massen $\dot{M}_{St,1}(d_T)$ und $\dot{M}_{St,2}(d_T)$ können aus den Volumenverteilungssummenkurven berechnet werden. Man erhält damit die Bestimmungsgleichung für den Fraktionsabscheidegrad aus dem Gesamtabseidegrad und den Differentialen der Volumenverteilungssummenkurve vor (dQ_{31}) und hinter (dQ_{32}) dem Entstaubungsapparat. Der Index 3 steht für das Volumen, die Indices 1 für den ungereinigten und 2 für den gereinigten Gasstrom

$$\eta_F(d_T) = 1 - \frac{dQ_{32}(d_T)}{dQ_{31}(d_T)} (1 - \eta_{ges}) \quad (3)$$

In Bild 5 ist die zum Messen von Partikelgrößenverteilungen verwendete Versuchseinrichtung schematisch dargestellt. Das zu analysierende Feststoffaerosol durchströmt während des Versuchs den Aerosolbehälter (1) (vgl. Bild 3, Nr. 10). Die Teilchengrößenanalyse wird durch gleichzeitiges Schliessen der Kugelventile (3) eingeleitet, so dass in dem Behälter ein stehendes Volumen von annähernd 800 l zur Verfügung steht. Nach Öffnen des Kugelventils (4), dessen Strömungskanal aufgrund einer Spezialanfertigung im geöffneten Zustand keine Querschnittsprünge aufweist, saugt der Aerosol-Counter einen konstanten Volumenstrom von $5 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ durch den Aerosolverdüner (9) ab.

Dieses Verdünnungssystem ist Ergebnis der umfangreichen Entstaubungsversuche, die vom U.S. Department of Energy ebenfalls mit einem nach dem Streulichtprinzip arbeitendem Partikelgrößenanalysator durchgeführt wurden [16]. Es ist hier notwendig, weil die Konzentration des erzeugten Schweißrauchs deutlich

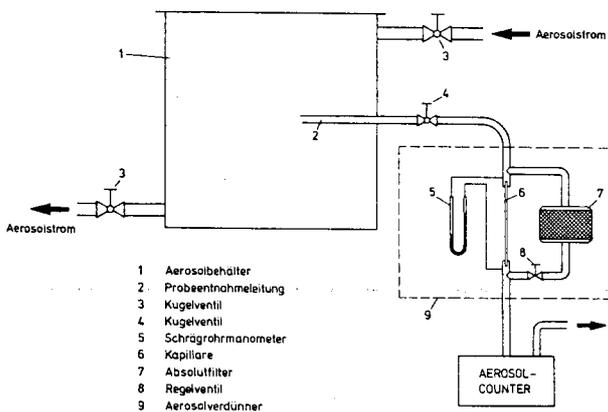


Bild 5. Versuchseinrichtung zum Messen von Partikelgrößenverteilungen.

Fig. 5. Experimental arrangement for measuring the distribution of the particle diameters.

oberhalb der für den Aerosol-Counter maximal zulässigen Teilchenkonzentration von 1800 Teilchen pro cm^3 Probevolumen liegt. Der Aerosolverdüner verringert daher die Teilchenkonzentration um den Faktor 400 nach dem in Bild 5 skizzierten Prinzip: Im Eintritt der Apparatur wird der Aerosolstrom mittels eines T-Stücks aufgeteilt. Ein Teilstrom gelangt durch Absolutfilter (7) und Ventil (8) in das zweite T-Stück. Er vereinigt sich dort mit dem übrigen Aerosolstrom, der ohne Veränderung seiner Zusammensetzung durch die Kapillare (6) geleitet wurde.

5. Erläuterung der Versuchsergebnisse

Für die Bewertung der gemessenen Entstaubungsgrade ist die Kenntnis der für die Stossabscheidung relevanten Eigenschaften des abgeschiedenen Rauchaerosols (Schweißrauch) unerlässlich. Die Teilchendichte wurde mit einem Flüssigkeitspyknometer [17] zu 2.45 g cm^{-3} gemessen. Die gemessene Korngrößenverteilung des erzeugten Schweißrauchs ist in Bild 6 aufgetragen und zwar in Form einer Volumenverteilungssummenkurve. Der Aerosolbehälter (vgl. Abb. 3, Nr. 10) war zu diesem Zweck zwischen Schweißapparat und Venturiwäscher installiert.

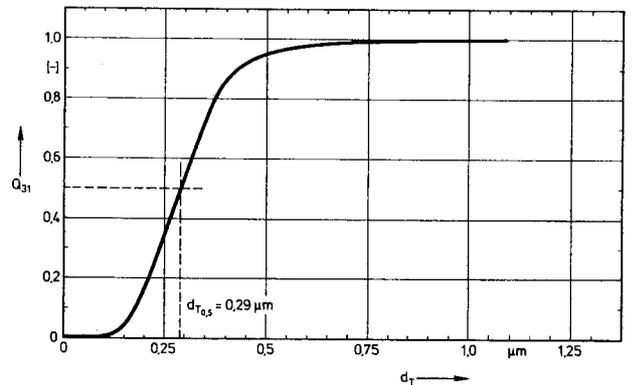


Bild 6. Volumenverteilungssummenkurve des Schweißrauchs.

Fig. 6. Cumulative curve of the diameter distribution of the smoke particles.

Die Verteilungssumme Q_{31} gibt den Anteil der Schweißrauchmasse an, der durch Teilchen mit Durchmessern kleiner und gleich d_T repräsentiert wird. Der volumenbezogene (bzw. der massenbezogene) mittlere Korndurchmesser des Schweißrauchs $d_{T0,5}$ beträgt $0,29 \mu\text{m}$. Mehr als 99% der Schweißrauchmasse besteht aus Teilchen mit Durchmessern unter $1,0 \mu\text{m}$ und etwa 1% der Rauchmasse bilden Partikeln unter $0,1 \mu\text{m}$.

In den Entstaubungsversuchen wurden zunächst Gesamtentstaubungsgrade gemessen. Die mit einstufiger Wassereindüsung in den Venturiwäscher gemessenen Gesamtabseidegrade sind in Bild 7 dargestellt als Funktion der Gasgeschwindigkeit in der Venturikehle, der sogenannten Kehlgengeschwindigkeit. Parameter ist die Waschflüssigkeitsbeladung L in der Kehle, die ein Verhältnis aus Wasser- und Gasvolumenstrom ist.

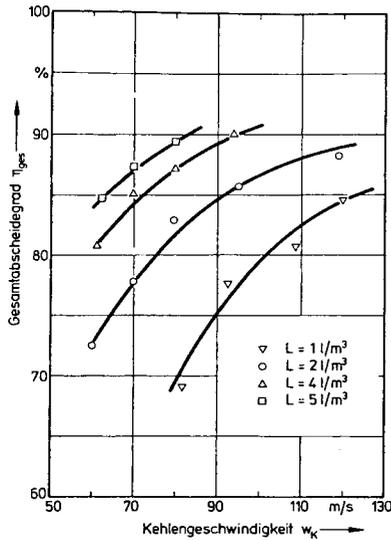


Bild 7. Gesamtabscheidegrad als Funktion von Kehlgengeschwindigkeit und Waschflüssigkeitsbelastung bei Eindüsung in einer Ebene.

Fig. 7. Total separation efficiency as a function of the gas velocity in the throat and of the amount of liquid added by water injection in one plane.

Die Gesamtabscheidegrade steigen mit zunehmender Kehlgengeschwindigkeit aufgrund der erhöhten Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen aber auch aufgrund der grösseren Austauschflächenbildung an. Die grössere Stoffaustauschfläche ist durch den mit wachsender Kehlgengeschwindigkeit intensivierten Impulsaustausch zwischen Gas und Waschflüssigkeit zu erklären. Der zu erkennende Anstieg der Entstaubungsgrade mit der Flüssigkeitsbelastung L ist ebenfalls eine Folge der grösseren Stoffaustauschfläche [7, 18].

Das Abflachen der Kurven zu höheren Gasgeschwindigkeiten ist mit der verstärkten Umlenkung der Flüssigkeitsstrahlen zu erklären. Die Mitte der Venturikehle wird dadurch immer schlechter mit Washwasser benetzt, im Extremfall kann sogar ein von Wasser freies Gebiet entstehen. Zusätzlich werden mit wachsender Gasgeschwindigkeit in der Kehle die Flüssigkeitsteilchen stärker beschleunigt, was zu einem raschen Absinken der für die Stossabscheidung notwendigen Relativgeschwindigkeit führt.

Um nun den Einfluss der mehrstufigen Wassereindüsung auf das Abscheidevermögen des Venturiwäscher zu ermitteln, wurden die Gesamtabscheidegrade zunächst für eine Wassereindüsung in zwei Düsenebenen gemessen. Das Washwasser wurde zu gleichen Teilen auf die Ebenen aufgeteilt. Die Ergebnisse sind in Bild 8 im Vergleich zur einstufigen Wassereindüsung dargestellt.

Aufgetragen ist wiederum der Gesamtabscheidegrad über der Kehlgengeschwindigkeit mit der Waschflüssigkeitsbelastung als Parameter. Die vollen Symbole kennzeichnen die Ergebnisse des zweistufigen Wassereindüsen. Man sieht, dass sich oberhalb einer bestimmten Kehlgengeschwindigkeit im zweistufigen Betrieb grössere Abscheidegrade ergeben. Diese Grenzgeschwindigkeit ist abhängig von der Waschflüssigkeitsbelastung. Unterhalb dieser Geschwindigkeit sind im Zweiebenenbetrieb die

Gesamtabscheidegrade kleiner und zwar, weil die in diesem Fall dünneren Wasserstrahlen den Querschnitt der Kehle schlechter durchdringen. Oberhalb dieser Grenzgeschwindigkeit kann die Verbesserung des Abscheideverhaltens bei gleicher Gasgeschwindigkeit in der Kehle nur auf eine grössere Stoffaustauschfläche im Fall der zweistufigen Eindüsung zurückzuführen sein.

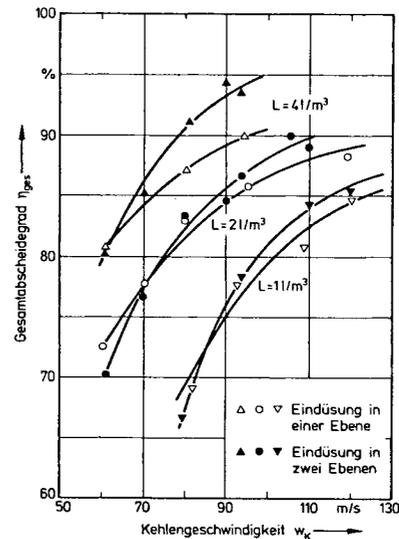


Bild 8. Gesamtabscheidegrad als Funktion von Kehlgengeschwindigkeit, Waschflüssigkeitsbelastung und Eindüsungsart.

Fig. 8. Total separation efficiency as function of the throat velocity, water loading of the gas and mode of water injection.

Aus den Untersuchungsergebnissen von Neumann [7] lässt sich zeigen, dass diese Austauschfläche mit wachsender Wasserbelastung nur degressiv ansteigt. Ein Aufteilen der gleichen Wassermenge auf zwei Ebenen führt daher zu einer insgesamt grösseren Phasengrenzfläche. Die Auswirkungen sind vor allem mit höheren Flüssigkeitsbelastungen gravierend, weil in diesem Bereich die Neigung der Kurve, die die Austauschfläche als Funktion der Wasserbelastung beschreibt, immer flacher wird.

Von besonderer Bedeutung für die technische Anwendung der mehrstufigen Flüssigkeitszufuhr in den Venturiwäscher ist nun die Frage, in welcher Weise diese den gaseitigen Druckabfall über den Wäscher beeinflusst. In Bild 9 sind zunächst die gemessenen gaseitigen Druckverluste über der Gasgeschwindigkeit in der Venturikehle für verschiedene Wasserbelastungen aufgezeichnet.

Der Druckverlust resultiert hauptsächlich aus Energiedissipation und Waschflüssigkeitsbeschleunigung [7, 19]. Er ist offensichtlich unabhängig davon, ob in einer oder zwei Ebenen die Waschflüssigkeit zugeführt wird. Man erkennt auch, dass für jede Wasserbelastung eine Kehlgengeschwindigkeit existiert, oberhalb derer der Druckverlust mit nahezu unendlicher Steigung zunimmt. Die Frage ist nun, welcher Druckverlust für einen bestimmten Gesamtabscheidegrad erforderlich ist.

Bild 10 zeigt den Zusammenhang zwischen gaseitigem Druckverlust Δp und dem Gesamtabscheidegrad

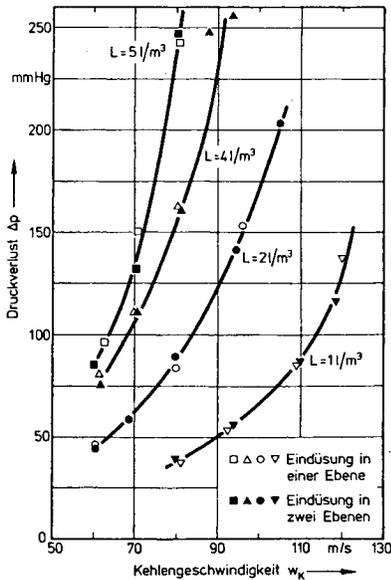


Bild 9. Druckverlust des Venturiwäschers als Funktion der Kehlgengeschwindigkeit und Wasserbeladung bei Eindüsung in einer und zwei Ebenen.

Fig. 9. Pressure loss of the Venturi scrubber as a function of the gas velocity in the throat, water loading by water injection in one and in two planes.

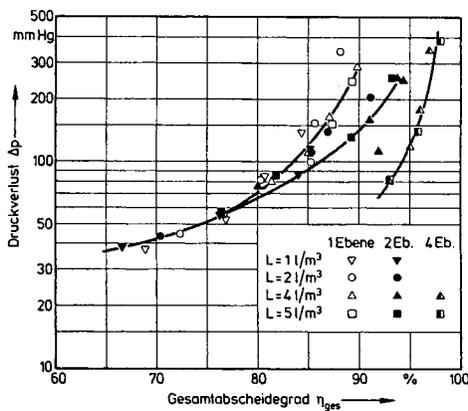


Bild 10. Druckverlust über den Venturiwäscher als Funktion des gemessenen Gesamtabscheidegrades bei Eindüsung in einer, zwei und vier Ebenen.

Fig. 10. Pressure loss in the Venturi scrubber as a function of the total separation efficiency with water injection in one, two and four planes.

η_{ges} . Die Ordinate ist logarithmisch geteilt. Man betrachte zunächst einmal nur die beiden Kurven mit den vollen und den offenen Symbolen, sie kennzeichnen die Versuchsergebnisse für die einstufige und die zweistufige Wasserzufuhr. Es ist zu erkennen, dass oberhalb eines bestimmten Abscheidegrades, der hier bei 77% liegt, der erforderliche Druckverlust im Zweiebenenbetrieb deutlich kleiner ist. Für einen Entstaubungsgrad von z.B. 90% ist der Druckabbau nur noch halb so gross. Zu erklären ist dieses Verhalten so, dass einerseits der Druckabfall über dem Wäscher unabhängig davon ist, ob in einer oder in zwei Düsenebenen eingedüst wird. Andererseits führt die zweistufige Eindüsung bei gleicher

Kehlgengeschwindigkeit und Wasserbeladung zu höheren Entstaubungsgraden bzw. ein gleicher Abscheidegrad wird mit kleineren Werten der Gasgeschwindigkeit und Wasserbeladung erzielt.

Es wurde bereits erläutert, dass als wesentliche Ursache für das verbesserte Entstaubungsverhalten die degressive Abhängigkeit der Austauschfläche von der Flüssigkeitsbeladung anzusehen ist. Es war daher auch zu erwarten, dass durch ein Aufteilen der Waschflüssigkeit auf vier Ebenen die Abscheideleistung weiter ansteigt. Der Kurvenverlauf im rechten Bildteil von Bild 10 bestätigt dies. Er repräsentiert die Ergebnisse der Entstaubungsversuche mit vierstufiger Wasserzufuhr: in dieser Betriebsart wurden die weitaus grössten Gesamtabscheidegrade gemessen. Sie liegen bei gleichem Energieaufwand um fast 8% oberhalb der Maximalwerte im Einebenenbetrieb. Für einen gleichen Abscheidegrad ist der Druckverlust mit vierstufigem Eindüsen der Flüssigkeit nur noch ein Bruchteil dessen, was in den übrigen Fällen erforderlich ist.

Fraktionsabscheidegrade wurden gemessen als Funktion der grundlegenden Betriebsparameter des Venturiwäschers—also der Kehlgengeschwindigkeit und der Wasserbeladung und zwar für die ein-, zwei- und vierstufige Wassereindüsung.

Bild 11 enthält beispielhaft die Messergebnisse für die Flüssigkeitseindüsung in einer Ebene. Aufgetragen ist der Fraktionsabscheidegrad über dem Teilchendurchmesser bei verschiedenen Kehlgengeschwindigkeiten w_K links für die Wasserbeladung $L = 2 \text{ l m}^{-3}$, rechts für $L = 4 \text{ l m}^{-3}$. Mit zunehmender Teilchengrösse d_T steigen die Abscheidegrade stark an, was aufgrund der Theorie der Stossabscheidung auch zu erwarten war. Mit wachsender Kehlgengeschwindigkeit nimmt die Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen zu, was sich vor allem bei den schlecht abzuschheidenden kleineren Teilchen gravierend auswirkt. Eine erhöhte Flüssigkeitsbeladung des Gasstroms führt ebenfalls zu grösseren Abscheidegraden für kleine Teilchen. Man erkennt dies sehr deutlich z.B. an den Kurven 5, die etwa bei der gleichen Kehlgengeschwindigkeit gemessen wurden.

Der Teilchendurchmesser, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% abgeschieden wird, der sogenannte Grenzkorndurchmesser, liegt in dieser Betriebsart zwischen $0,1 \mu\text{m}$ und $0,2 \mu\text{m}$. Holzer [20] hat für einen einstufigen Venturiwäscher ein mögliches Grenzkorn von $0,05 \mu\text{m}$ bis $0,2 \mu\text{m}$ angegeben. Diesem Diagramm kann man entnehmen, dass ein Grenzkorn von $0,05 \mu\text{m}$ etwa mit $L = 4 \text{ l m}^{-3}$ und $w_K = 120 \text{ m s}^{-1}$ erreichbar wäre. Allerdings existiert ja für jede Wasserbeladung eine Kehlgengeschwindigkeit, oberhalb derer der Druckverlust des Wäschers mit nahezu unendlicher Steigung zunimmt. Für eine Beladung von $4 \text{ l Wasser pro m}^3 \text{ Gas}$ liegt dieser Punkt etwa bei 95 m s^{-1} (vergl. Bild 9).

Zum Vergleich der Fraktionsabscheidegrade für die verschiedenen Betriebsparameter des Venturiwäschers (Kehlgengeschwindigkeit w_K , Waschflüssigkeitsbeladung L , Anzahl der Düsenebenen) lässt sich sehr gut der Grenzkorndurchmesser heranziehen. Dieser Teilchendurchmesser, der zu 50% abgeschieden wird, ist in Bild 12 aufgetragen als Funktion der Kehlgengeschwindigkeit mit der Waschflüssigkeitsbeladung und der Anzahl der

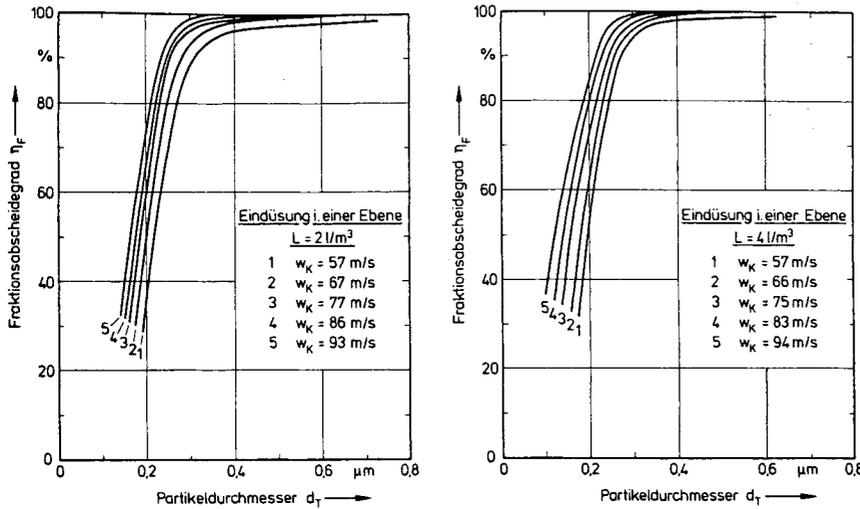


Bild 11. Fraktionsabscheidegrad η_F bei Eindüsung in einer Ebene als Funktion der Kehlgengeschwindigkeit w_K und der Wasserbeladung L .
 Fig. 11. Fractional separation efficiency η_F with water injection in one plane as a function of the gas velocity w_K in the throat and of the water loading L .

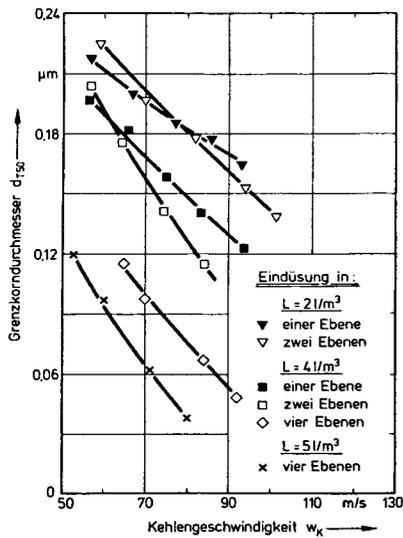


Bild 12. Gemessener Grenzkorndurchmesser d_{T50} als Funktion der Kehlgengeschwindigkeit w_K , der Wasserbeladung L und der Düsenbenenzahl.

Fig. 12. Near-mesh diameter of the particles d_{T50} as a function of the gas velocity in the throat w_K , the water loading L and the number of planes with water injection.

Düsenebenen als Parameter. Im oberen Bildteil sind die Ergebnisse für die ein- und zweistufige Eindüsung, im unteren Bildteil für die vierstufige Wasserzufuhr zu erkennen. Grundsätzlich sinkt der Grenzkorndurchmesser mit zunehmender Kehlgengeschwindigkeit und mit zunehmender Wasserbeladung. Er hat eine direkte Beziehung zu dem Gesamtabseidegrad. Mit steigendem Gesamtabseidegrad werden nämlich notwendigerweise immer mehr kleinere Teilchen abgeschieden, d.h. dass deren Fraktionsabscheidegrade entsprechend grösser werden. Dies ist aber gleichbedeutend mit fallenden Grenzkorndurchmessern. Grenzkorn und Gesamtabseidegrad müssen also in Einklang zu bringen sein.

Man betrachte zunächst die ein- und zweistufige Wasserzufuhr, also die Kurven im oberen Bildteil. Aus Bild 8 wurde deutlich, dass die Gesamtabseidegrade im zweistufigen Betrieb des Wäschers erst ab einer gewissen, von der Wasserbeladung abhängigen Kehlgengeschwindigkeit grösser sind. Das gleiche Verhalten zeigt sich in Bild 12: erst ab einer gewissen, von der Wasserbeladung abhängigen Kehlgengeschwindigkeit—die Schnittpunkte der Kurven—sind die Grenzkorndurchmesser im Zweiebenenbetrieb kleiner. Diese Kehlgengeschwindigkeiten, die mit Grenzggeschwindigkeiten bezeichnet wurden, sind für die gemessenen Gesamtabseidegrade und die gemessenen Grenzkorndurchmesser nahezu gleich.

Bei vierstufigem Wassereindüsen ergaben sich die weitaus kleinsten Grenzkorndurchmesser. Der kleinste gemessene Wert lag bei $0,038 \mu\text{m}$. Dies ist verständlich, weil auch die Gesamtabseidegrade in dieser Betriebsart sehr viel grösser als in allen anderen Fällen waren.

6. Zusammenfassung

Venturiwäscher sind einfache und betriebssichere Entstaubungsanlagen mit geringen Grenzkorndurchmessern. Der wesentliche Nachteil der herkömmlichen einstufigen Bauart mit Quereindüsung der Waschflüssigkeit in den engsten Querschnitt liegt in dem sehr hohen gaseitigen Druckverlust über den Wäscher. In dem vorliegenden Aufsatz wurde gezeigt, dass das Abscheideverhalten des Hochleistungs-Venturiwäschers durch mehrstufige Flüssigkeitseindüsung bedeutend verbessert werden kann: man erreicht einerseits erheblich grössere Abscheidegrade, andererseits können gleiche Abscheidegrade mit einem Bruchteil des ursprünglichen Energieaufwands erzielt werden. Für einen Gesamtabseidegrad von beispielsweise 90% wird der Energieaufwand halbiert, wenn man die Waschflüssigkeit in zwei statt in einer Ebene eindüst.

Die vierstufige Flüssigkeitszufuhr führt zu einem weiteren bedeutenden Absinken des Druckverlustes

gegenüber der ein- und zweistufigen Betriebsart für einen gleichen Gesamtabscheidegrad.

Mit einstufiger Wassereindüsung lassen sich keine Grenzkorndurchmessern unter $0,1 \mu\text{m}$ einstellen, mit vierstufiger Wasserzufuhr werden sogar Teilchen mit $0,04 \mu\text{m}$ Durchmesser noch zu 50% abgeschieden.

Die Verfasser danken dem Bundesministerium für Forschung und Technologie für die finanzielle Förderung im Rahmen des Projektes MTK 0193.

Formelzeichen

d_T	Teilchendurchmesser, μm
d_{Tr}	Tropfendurchmesser, μm
$d_{T0,5}$	mittlerer (volumenbezogen) Teilchendurchmesser, μm
d_{T50}	Grenzkorndurchmesser, μm
L	Waschflüssigkeitsbeladung = Wasservolumenstrom/ Gasvolumenstrom in der Venturikehle, m^{-3}
$\dot{M}_{St,1}$	Staubmassenstrom vor dem Venturiwäscher, mg s^{-1}
$\dot{M}_{St,2}$	Staubmassenstrom hinter dem Venturiwäscher, mg s^{-1}
Δp	Druckverlust über den Venturiwäscher, mm Hg
Q_{31}	Volumenverteilungssumme des Rauchaerosols vor dem Venturiwäscher
Q_{32}	Volumenverteilungssumme des Rauchaerosols hinter dem Venturiwäscher
w_K	Gasgeschwindigkeit in der Venturikehle, m s^{-1}
w_R	Relativgeschwindigkeit zwischen Gas und Waschflüssigkeit, m s^{-1}
η_F	Fraktionsabscheidegrad
η_{ges}	Gesamtabscheidegrad

Literatur

- 1 E. Weber, Der Einfluss der Benetzbarkeit von Stäuben bei der Nassabscheidung, *Staub-Reinhalt. Luft*, 28 (11) (1968) 462–467.
- 2 G. Schuch, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Auslegung von Nassabscheidern, *Dissertation*, Universität Karlsruhe, 1978.
- 3 H. Güntheroth, Schwebstoff-Nassabscheidung mit dem Venturi-Scrubber, *Fort.-Ber. VDI-Z., Reihe 3*, Nr. 13 (1966).
- 4 R. B. Feild, Collection of aerosol-particles by atomized sprays, *Ph.D. Thesis*, University of Illinois.
- 5 H. F. Johnstone, R. B. Feild und M. C. Tassler, Gas absorption and aerosol collection in a Venturi atomizer, *Ind. Eng. Chem.*, 46 (8) (1954) 1601–1608.
- 6 W. Sell, Staubabscheidung an einfachen Körpern und in Luftfiltern, *VDI-Forschungsheft 347*, 1931.
- 7 M. Neumann, Ein Beitrag zum Abscheidemechanismus im Venturi-Wäscher, *Dissertation*, Universität Hannover, 1978.
- 8 D. B. Roberts und J. C. Hill, Atomization in a Venturi-scrubber, *Chem. Eng. Commun.*, 12 (1981) 33–68.
- 9 S. Röhle, Geschwindigkeitsgleiche Absaugung zur sonder-technischen Bestimmung von Transportgrößen, Vortrag auf dem 2. Europäischen Symposium "Partikelmess-technik", 24. bis 26.9.1979, Nürnberg.
- 10 P. Zenker, Untersuchungen zur Frage der nichtgeschwindigkeitsgleichen Teilstromentnahme bei der Staubgehaltsbestimmung in strömenden Gasen, *Staub-Reinh. Luft*, 31 (6) (1971) 252–256.
- 11 E. Fernandes und P. Suter, Absaugesonden für Gas/Partikel-Suspensionen ohne Störung der Strömung, *Brennst.-Wärme-Kraft*, 26 (12) (1974) 502–506.
- 12 R. Krebs, Staubgehaltsmessungen in strömenden Gasen. Veröffentlichung der Lurgi-Apparatebau GmbH, Forschungslaboratorium 7, 1967.
- 13 Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen, gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung, *VDI-2066, Blatt 2*, August 1979.
- 14 K. Leschonski, Die Entwicklung der modernen Partikelmess-technik, *Freib. Forsch.-H. A 633*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1980.
- 15 O. Preining, Optical sizing techniques, *Tech. Rep. Ser. Intern. Atomic Energy Agency, Col. 179* (1978) 153–170.
- 16 Anon., In-place testing of HEPA filter systems by the single-particle, particle-size spectrometer method, U.S. Department of Energy, October 1980.
- 17 H. Böttcher, Persönliche Mitteilungen, 1982.
- 18 H. Normine, Untersuchungen zum Abscheideverhalten des Hochleistungs-Venturiwäschers, *Dissertation*, Universität Hannover, 1981.
- 19 S. Ripperger und G. Dau, Berechnung des Druckverlustes von Venturi-Wäschern, *Verfahrenstechnik*, 14 (3) (1980) 164–168.
- 20 K. Holzer, Nassabscheidung von Feinstäuben und Aerosolen, *Chem. Ing. Techn.*, 51 (3) (1979) 200–207.