

# Verfahren zur geschwindigkeitsgleichen Absaugung mit Differenzdrucksonden<sup>\*)</sup>

Von Stephan Röthele, Clausthal-Zellerfeld<sup>\*\*)</sup>

Röthele, Stephan:

## Verfahren zur geschwindigkeitsgleichen Absaugung mit Differenzdrucksonden

Staub - Reinhalt. Luft 42 (1982) Nr. 1, S. 6/10  
9 Bilder, 8 Lit.-Ang.

Zur experimentellen Charakterisierung von Gas-Feststoff-Zweiphasenströmungssystemen bei hohen Feststoffkonzentrationen und in großen Strömungsräumen verwendet man Absaugsonden, wenn rückwirkungsfrei arbeitende Meßverfahren nicht eingesetzt werden können.

Eine wesentliche Voraussetzung für die weitgehend fehlerfreie Anwendung von Absaugsonden ist dabei die Gewährleistung geschwindigkeitsgleicher Teilstromentnahme. Bei sogenannten Nulldrucksonden gelingt es nicht, isokinetischen Betrieb zu realisieren. Es wird ein System vorgestellt, das ein Absaugverfahren realisiert, bei dem die geschwindigkeitsgleiche Teilstromentnahme auf den abgesaugten Teilvolumenstrom mit dem kalibrierten Differenzdruck zwischen statischen Drücken im Haupt- und Teilstrom zurückgekoppelt wird und so seine eigene Verursachung regelt. Die geschlossene Kreisstruktur ermöglicht damit nach einer einmaligen Kalibrierung die richtige Anwendung in beliebigen, vorher nicht bekannten Zweiphasenströmungssystemen.

### A method for isokinetic sampling with differential pressure probes

Suction probes must be used for the experimental characterization of a two-phase flow system if solids concentration is high and the measurement takes place in large flow channels. This is the area, where disturbance free measuring techniques cannot be applied.

The appropriate and as far as possible errorfree application of suction probes is possible only when isokinetically withdrawing part of the main stream.

So called zero pressure probes cannot be operated on an isokinetic basis.

A system is proposed which, based on pressure measurements, uses a self regulating principle for the true isokinetic withdrawal.

The relationship between volume of air withdrawn, calibrated differential pressure drop and pressure drop in main and partial stream can be used as feed back for the self regulating principle. The probe is therefore able to find the isokinetic point in any given flow of a certain velocity. The probe and its electronic system immediately adjust the volume flow rate of air if the air velocity changes or fluctuate in the main stream.

### Procédé pour l'aspiration à vitesse égale au moyen de sondes à pression différentielle

Pour la caractérisation expérimentelle de systèmes de courants biphasés de gaz ou de matière solide lors de hautes teneurs en matière solide et dans de grands locaux de courant on utilise des sondes d'aspiration, si l'emploi de procédés de mesure travaillant sans réaction n'est pas possible.

L'assurance de prélèvements partiels sur le courant à vitesse égale représente une présupposition élémentaire pour l'utilisation continuellement libre d'erreurs de sondes d'aspiration. Pour ce qui est des dénommées sondes sans pression on n'arrive pas à réaliser une fonctionnement isokinétique. Est présenté un système, réalisant un procédé d'aspiration chez lequel le prélèvement partiel sur le courant est raccouplé au courant à volume partiel avec la pression différentielle étalonnée entre les pressions statiques dans le courant central et partiel, réglant ainsi sa propre cause. La structure à circuit fermé permet ainsi l'utilisation juste dans de quelconques systèmes de courants biphasés inconnus auparavant après un seul étalonnage.

**Schlagwörter:** Meßtechnik-, Sondenmeßtechnik / Meßtechnik-, Teilchenmeßtechnik / Teilchen-, Messung / Emission-, Messung

## 1 Einleitung

Zur experimentellen Charakterisierung von Gas-Feststoff-Zweiphasenströmungen verwendet man Sonden, wenn bei hohen Feststoffkonzentrationen und in großen Strömungsräumen rückwirkungsfrei arbeitende Meßverfahren nicht eingesetzt werden können.

Sondentechniken werden grundsätzlich unter dem einschränkenden Gesichtspunkt eingeordnet, den auszumessenden Vorgang störend zu beeinflussen. Der weitverbreitete Einsatz von Sonden in der Strömungstechnik beweist aber, daß unvermeidliche Rückwirkungen Ausgangspunkte wünschenswerter Meßeffekte sein können. Wenn es gelingt, die störenden Einflüsse klein zu halten und zu beherrschen, ist die Sondenmeßtechnik ein unverzichtbares Instrument zur Bestimmung von Transportgrößen. Nicht zufällig steht der Begriff „Sondieren“ im

Deutschen synonym für behutsames Auskundschaften.

Im folgenden soll gezeigt werden, welche Bedeutung der geschwindigkeitsgleichen Absaugung zukommt. Eine neue Möglichkeit zur technischen Realisierung wird vorgestellt.

## 2 Ausführungsformen und Anwendungsgebiete

Die bekanntgewordenen experimentellen Untersuchungen mit Sonden erlauben eine prinzipielle Einteilung in zwei Anwendungsgebiete mit unterschiedlichen Ausführungsformen [1].

Die erste Gruppe umfaßt Absaugsonden zur repräsentativen Probennahme und Feststoffkonzentrationsmessung, wobei ein Teilstrom aus dem Zweiphasen-Hauptstrom unter Einhaltung gewisser noch näher zu erläuternder Bedingungen abgesaugt wird. Diese Technik ermöglicht eine Probennahme mit in der Regel zeitverzögerter Auswertung hinsichtlich Staubgehalt, Gutbelastung oder anderer vergleichbarer Konzentrationenmaße und der lokalen Größenverteilung.

Zur zweiten Gruppe gehören Sonden, bei denen die Transportgrößen durch Rückwirkung der Partikel- und Fluidphase auf einen geeigneten Geber aus Feldstörungen oder Kontakteffekten ermittelt werden. Dabei erfolgt die Meßwertaufnahme der unterschiedlichen Zielgrößen nicht zeitgleich und immer mit speziell nur für eine Größe geeigneten Sonden.

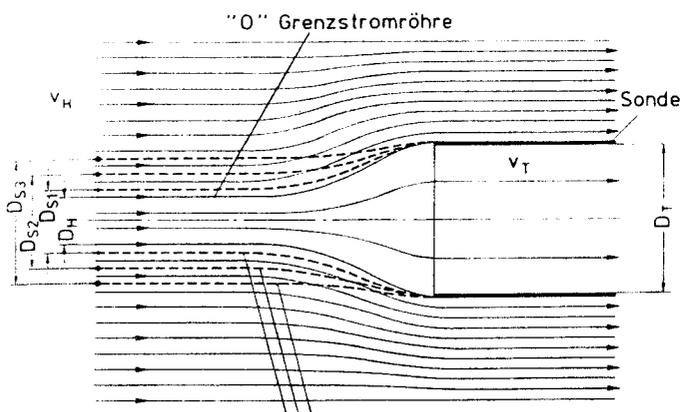
Eine dritte Gruppe kombiniert die Möglichkeiten beider Systeme. Damit aber aus der Kombination dieser Gruppen sondenteknischer Meßmethoden leistungsfähige und für komplexere Aufgabenstellungen geeignete Mehrkomponentensonden entwickelt werden können, ist ein Verfahren erforderlich, das die repräsentative Teilstromentnahme gewährleistet.

## 3 Teilstromentnahme

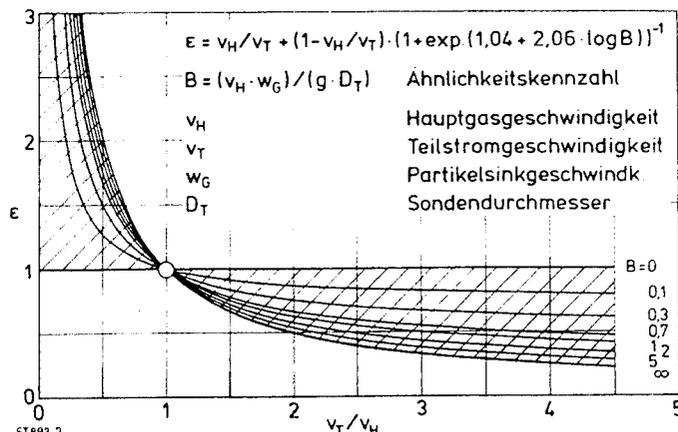
Die repräsentative Absaugung des Teilstromes gelingt nur dann, wenn Geschwindigkeitsgleichheit zwischen Hauptstrom und Teilstrom eingehalten wird. In Bild 1 sind die Strömungsverhältnisse in der

<sup>\*)</sup> Erweiterte Fassung eines Vortrages vom 2. Europäischen Symposium „Partikelmeßtechnik“, PARTEC, Nürnberg, 25.-27. 09. 79.

<sup>\*\*)</sup> Anschrift des Verfassers: s. Autorenverzeichnis



ST893.1  
Bild 1: Verlauf von Grenzstrom- und Grenzstaubröhren bei Absaugung  $v_T/v_H < 1$



ST893.2  
Bild 2: Bestimmung des relativen Staubgehaltes  $\epsilon$  nach Zenker [5]

Nähe der Sondenöffnung qualitativ dargestellt.

Bei nichtgeschwindigkeitsgleichem Absaugen lassen sich die zwei Fälle unterscheiden, daß die Geschwindigkeit im Teilstrom größer oder kleiner als im Hauptstrom eingestellt ist. Im zweiten Fall, der in Bild 1 dargestellt ist, wirkt die Sonde auf das anströmende Fluid vor der Sondenöffnung so, daß das Modell der Kugelumströmung als Ersatzströmungsfeld den Verlauf der Grenzstromlinien richtig beschreibt [2]. Man erkennt, daß eine sogenannte Grenzstromröhre existiert, die gerade auf die Sondenwand auftrifft.

Der Gasstrom innerhalb dieser Grenzstromröhre gelangt in die Sonde, das Gas außerhalb strömt an der Sonde vorbei. Aufgrund seiner Massenträgheit kann der im Gasstrom transportierte Feststoff die Bewegung des Gases nicht vollständig mitmachen und wird sich auf einer Bahn bewegen, die nicht mit einer Stromlinie identisch ist. In die Sonde selbst werden deshalb alle Partikeln gelangen, die sich innerhalb der sogenannten „Grenzstaubröhren“ befinden. Dabei beschreibt die Grenzstaubbahn die Flugbahn eines Feststoffpartikels, das gerade auf die Sondenwand auftrifft. Bei sonst gleichen Strömungsverhältnissen ergibt sich wegen der unterschiedlichen Massenträgheit für jede Partikelgröße eine andere Grenzstaubröhre.

Für den dargestellten Fall bedeutet dies, daß große Partikeln häufiger und kleine Partikeln seltener im entnommenen Teilstrom enthalten sind als bei richtiger Teilstromentnahme für das anströmende Zweiphasenströmungsgemisch repräsentativ wäre.

Ein erster Ansatz zur quantitativen Erfassung dieser Problematik stammt von

Badzioch [3]. Rüping [4] bestimmte aufgrund ausgemessener Stromlinien vor der Sondenöffnung die auftretenden Meßfehler. Bohnet [2] entwickelte mittels potentialtheoretischer Berechnung des Strömungsfeldes vor der Sondenöffnung ein Modell, das mit den bekanntgewordenen Meßergebnissen gut übereinstimmt.

Umfangreiche experimentelle Untersuchungen von Zenker [5] haben schließlich den in Bild 2 dargestellten analytischen Zusammenhang zwischen dem relativen Staubgehalt  $\epsilon$  des Gases in der Sonde und dem Geschwindigkeitsverhältnis  $v_T/v_H$  ergeben:

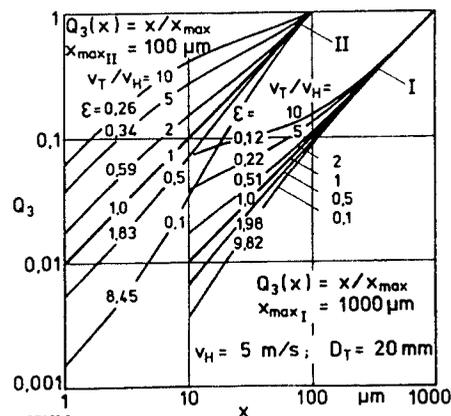
$$\epsilon = \frac{v_H}{v_T} + \left(1 - \frac{v_H}{v_T}\right) \cdot (1 + \exp \bar{B})^{-1} \quad (1a)$$

$$\bar{B} = (1,04 + 2,06 \cdot \log B)^{-1} \quad (1b)$$

Führt man die für die Bewegung der Partikeln kennzeichnende Barthsche Kennzahl

$$B = \frac{v_H \cdot w_\theta}{g \cdot D_T} \quad (2)$$

ein, in der das Partikel durch seine Sinkgeschwindigkeit  $w_\theta$ , die Hauptströmung



ST893.3  
Bild 3: Einfluß nichtgeschwindigkeitsgleicher Absaugung auf Partikelgrößenverteilung  $Q_3(x)$  und relativen Staubgehalt  $\epsilon$

durch ihre Geschwindigkeit  $v_H$  und die Sonde durch ihren Durchmesser  $D_T$  berücksichtigt sind, so ergibt sich in Abhängigkeit vom Verhältnis der Teilstromgeschwindigkeit  $v_T$  zur Hauptstromgeschwindigkeit  $v_H$  die in Bild 2 aufgezeichnete Kurvenschar.

Man erkennt an diesem Bild, daß für  $B \rightarrow 0$ , d. h. Partikeln die der Gasströmung ohne Abweichung folgen und sehr kleine Sinkgeschwindigkeiten  $w_\theta$  besitzen, das Verhältnis  $v_T/v_H$  keinen oder einen nur sehr geringen Einfluß auf den Staubgehalt hat.

Für reale Partikeln mit  $B$ -Werten zwischen Null und unendlich ergibt sich bei nicht geschwindigkeitsgleicher Absaugung immer ein Fehler in der Bestimmung des Staubgehaltes. Man erkennt auch, daß bei von  $B = 0$  abweichenden Daten sich eine überkritische Absaugung eher empfiehlt, da dann die Zunahme der relativen Fehler kleiner ist. Unabhängig von  $B$  ergibt sich andererseits bei geschwindigkeitsgleicher Absaugung, d. h.  $v_T/v_H = 1$ , kein Fehler im relativen Staubgehalt  $\epsilon$  des Gases in der Sonde.

In Bild 3 ist die Auswirkung nichtgeschwindigkeitsgerechter Absaugung auf die nach der Probenahme analysierte Partikelgrößenverteilung in ihrer Veränderung gegenüber der Partikelgrößenverteilung der im Hauptstrom transportierten dispersen Phase dargestellt. Die Werte sind auf der Grundlage der in [5] angegebenen Abhängigkeiten für zwei Partikelgrößenverteilungen für unterschiedliche Geschwindigkeitsverhältnisse berechnet und verglichen dargestellt worden. Man erkennt, daß in beiden Fällen bei nichtgeschwindigkeitsgleicher Absaugung von der richtigen Verteilung abweichende Größenverteilungen erhalten werden.

Dies führt gleichzeitig zu erheblichen

## Verfahren zur geschwindigkeitsgleichen Absaugung mit Differenzdrucksonden

Fehlern in der Staubgehaltsbestimmung. Bei der größeren Partikelgrößenverteilung, die im Potenznetz zwischen 10 und 1000  $\mu\text{m}$  linear verlaufend angenommen wurde, sind die Abweichungen in den Größenverteilungen vergleichsweise geringer, die Konsequenzen für die Staubgehaltsbestimmungen aber größer. Für die zweite Partikelgrößenverteilung, die zwischen 1 und 100  $\mu\text{m}$  linear verlaufend angenommen wurde, ist der Einfluß auf die Größenverteilung noch gravierender. Die Forderung geschwindigkeitsgerechter Probenahme durch Absaugung ist also sowohl für die Vermeidung von Staubgehaltsmeßfehlern als auch für die Vermeidung von Entmischungen und damit in der Folge fehlerhaft analysierter Kornverteilungen von entscheidender Bedeutung.

### 4 Nulldrucksonden

Zur technischen Realisierung geschwindigkeitsgleicher Absaugung sind aus der Praxis zwei Möglichkeiten bekannt. Die erste benutzt ein Staurohr, um die an der Meßstelle erforderliche Absauggeschwindigkeit vor der Absaugung bestimmen zu können. Einschränkend ist hierbei zu berücksichtigen, daß durch die Schleppwirkung der im Staurohr abgebremsten Partikeln insbesondere bei hohen Konzentrationen die Staudruckanzeige verfälschend beeinflusst wird und darüber hinaus lokale Strömungsdeformationen und -veränderungen, die zeitabhängig sind, bei späterer Absaugung mit einer anderen Sonde nicht erkannt und berücksichtigt werden können.

Die zweite Methode arbeitet nach dem Null- oder auch Gleichdruckprinzip, wobei die Differenz des statischen Druckes des Teilgasstromes, gemessen im Inneren der Sonde,  $p_{\text{stat } T}$ , und des statischen Druckes des Hauptstromes, gemessen an der Außenwand der Sonde,  $p_{\text{stat } H}$ , durch Verändern des abgesaugten Volumenstromes  $\dot{V}_T$  zu Null gemacht wird.

Bild 4 zeigt den Verlauf der statischen Drücke beispielhaft für eine Sonde mit einem Innendurchmesser  $D_T = 8 \text{ mm}$  im Geschwindigkeitsbereich bis 50 m/s. Die Messungen erfolgten im 1-m-Windkanal der DFVLR/AVA in Göttingen. Der obere Teil des Diagrammes enthält die resultierenden Druckverläufe als Differenzwerte zum Umgebungsdruck, wenn die Sonde ohne Absaugung als Stausonde betrieben wird ( $v_T/v_H = 0$ ). Die Kalibrierkurven sind zur Geschwindigkeitsmessung prinzipiell verwendbar.

Der untere Teil des Diagrammes zeigt

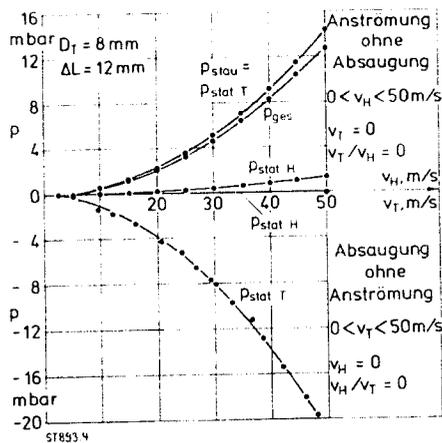


Bild 4: Verlauf der statischen Drücke  $p_{\text{stat } T}$  an Sondeninnen- und -außenwand  $p_{\text{stat } H}$

den zweiten Extremfall, nämlich den statischen Druckverlauf im Sondeninneren  $p_{\text{stat } T}$ , wenn in den aufgezeichneten Geschwindigkeitsbereichen abgesaugt wird, ohne daß eine Anströmung erfolgt. Der statische Druckverlauf an der Sondenaußenwand  $p_{\text{stat } H}$  ist dann bei Null.

Man erkennt, daß der Verlauf des statischen Druckes des Teilstromes den ge-

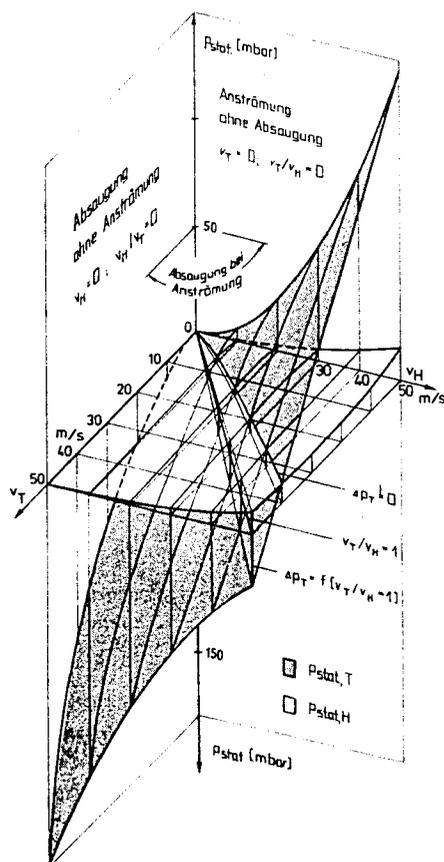


Bild 5: Verlauf der statischen Drücke an Sondeninnen- und -außenwand bei Absaugung mit Anströmung

samten in Frage kommenden Differenzdruckbereich einhüllt. Für den zu realisierenden Fall der Absaugung bei Anströmung verläuft der statische Druck im Sondeninneren und an der Sondenaußenwand voneinander verschieden. Die richtige Darstellung dieser unterschiedlichen Druckverläufe gelingt dann, wenn man sich dieses Bild an der Geschwindigkeitsachse aufgeschnitten und in die dreidimensionale Darstellung von Bild 5 aufklappt vorstellt. Man erkennt aus dieser Darstellung, daß bei gleichzeitiger Absaugung und Anströmung die statischen Drücke von Teil- und Hauptstrom auf unterschiedlichen Flächen zu finden sind. Die graue Fläche stellt dabei die möglichen Orte der statischen Drücke des Teilstromes dar. Die sich nur geringfügig aus der Geschwindigkeitsebene herauswölbende weiße Fläche beschreibt die möglichen Orte der statischen Drücke des Hauptstromes, wie er gemessen werden kann, wenn unterschiedliche Geschwindigkeitsverhältnisse vorliegen.

Als begrenzende Linien dieser Flächen findet man die in Bild 4 gezeigten statischen Druckverläufe einmal als Spuren in der begrenzenden Ebene, die durch Anströmung ohne Absaugung gekennzeichnet ist, und entsprechend in der anderen begrenzenden Ebene, die durch Absaugung ohne Anströmung gekennzeichnet ist.

Dort, wo sich die beiden Flächen durchstoßen, entsteht die Schnittlinie, die Druckgleichheit zwischen statischem Druck in Haupt- und Teilstrom kennzeichnet. Sie stellt gleichzeitig die Betriebskennlinie der Sonden dar, die nach dem Null- oder Gleichdruckprinzip betrieben werden. Die Fußpunkte dieser Schnittlinie in der Geschwindigkeitsebene bei  $p_{\text{stat}} = 0$  sind nicht identisch mit der Winkelhalbierenden zwischen der Geschwindigkeitsachse des Teilstromes und der Geschwindigkeitsachse des Hauptstromes, die die Geschwindigkeitsgleichheit charakterisiert, so daß damit die Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Nulldruckkriteriums zur Einstellung der Geschwindigkeitsgleichheit zwischen Haupt- und Teilstrom entfällt.

Dies bestätigt der meßtechnische Befund der in Bild 6 vergleichend dargestellten Kalibrierkurven von Nulldrucksonden. Stellt man bei der Kalibrierung Druckgleichheit zwischen Innen- und Außendruck durch entsprechende Absaugung ein, so ergibt sich für die dann in der Sonde herrschende Absauggeschwindigkeit  $v_T$ , hier charakterisiert durch

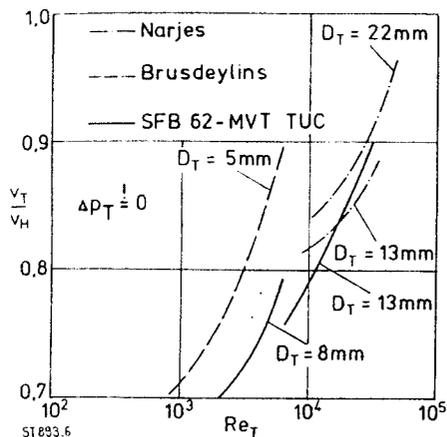


Bild 6: Kalibrierkurven von Nulldrucksonden ( $\Delta p_T = 0$ )

$$Re_T = \frac{v_T \cdot D_T}{\gamma} \quad (3)$$

ein bestimmtes Verhältnis  $v_T/v_H$ .

Der Verlauf der hier vergleichend für unterschiedliche Sonden (vgl. auch [6]) ermittelten Kalibrierkurven läßt deutlich erkennen, daß Geschwindigkeitsgleichheit nicht oder bei großen Sonden sich nur für sehr hohe Anströmgeschwindigkeiten erreichen läßt und demnach Geschwindigkeitsgleichheit über den Abgleich der statischen Drücke nicht zu erreichen ist.

Verschiedene Autoren haben versucht, eine Verbesserung durch Stauringe auf der Außenwand zu erreichen. Diese Druckkorrektur ist aber geometriestimmig und unzuverlässig, wenn man mehr als nur einen Strömungszustand beherrschen muß.

### 5 Differenzdrucksonde

Die statischen Drücke von Haupt- und Teilstrom sind trotzdem als Meßgrößen für die Einstellung geschwindigkeitsgleicher Absaugung geeignet, wenn es gelingt, den für die jeweils erforderliche Absaugungssituation bei tatsächlicher Geschwindigkeitsgleichheit dann zwangsläufig zwischen den statischen Drücken in Haupt- und Teilstrom vorhandenen Differenzdruck  $\Delta p_T$  als Einstellgröße zur dynamischen Tarierung des Absaugsystems zu benutzen.

In der Darstellung in Bild 5 findet man diese Einstellgröße  $\Delta p_T$  in der Ebene, die zwischen den Flächen der statischen Drücke in Haupt- und Teilstrom normal auf der Linie der Geschwindigkeitsgleichheit  $v_T/v_H = 1$  aufgespannt ist.

In Bild 7 ist gezeigt, wie man die Einstellgröße  $\Delta p_T$  experimentell ermitteln kann. Als Variationsparameter für die

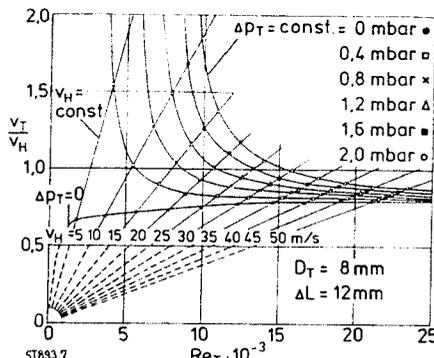


Bild 7: Kalibrierkurven einer Differenzdrucksonde ( $\Delta p_T > 0$ )

Versuche dient der Differenzdruck  $\Delta p_T$  zwischen statischem Druck im Teilstrom und statischem Druck im Hauptstrom. Für  $\Delta p_T = 0$ , d. h. Druckgleichheit zwischen innen und außen, resultiert die Kalibrierkurve einer Nulldrucksonde. Man erkennt auch hier, daß bei dieser Bedingung Geschwindigkeitsgleichheit an keinem Punkt erreicht wird. Durch das Festhalten eines Differenzdruckes  $\Delta p_T > 0$  wird aber der Verlauf der Kalibrierkurven entscheidend verändert.

Die eingezeichnete Kurvenschar unterschiedlicher Kalibrierparameter

$$0 \text{ mbar} \leq \Delta p_T \leq 2,0 \text{ mbar} \quad (4)$$

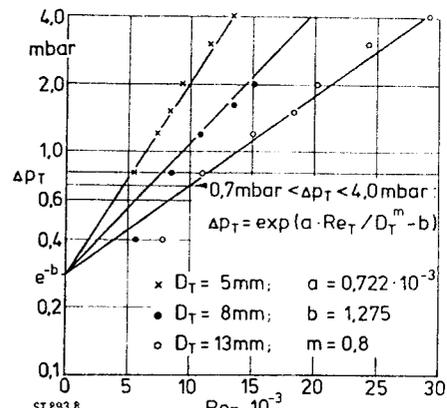


Bild 8: Tarierfunktionen  $\Delta p_T = f(Re_T, D_T, \Delta L = \text{const.})$

resultiert, wenn man bei variierten Hauptstromgeschwindigkeiten

$$5 \text{ m/s} \leq v_H \leq 50 \text{ m/s} \quad (5)$$

die abgesaugte Teilstrommenge und damit die Teilstromgeschwindigkeit  $v_T$  so einstellt, daß die vorgegebenen Parameterwerte  $\Delta p_T = \text{const.}$  eingehalten werden. Es ergibt sich eine eindeutige Zuordnung zwischen dem Kurvenparameter  $\Delta p_T$  und dem zugehörigen abgesaugten Teilvolumenstrom, charakterisiert mit  $Re_T$ , in den Schnittpunkten jeder Kalibrierkurve mit der Achsparallelen  $v_T/v_H = 1$ . Die Meßwerte gelten für eine Sonde mit einem Innendurchmesser  $D_T = 8 \text{ mm}$  und einem

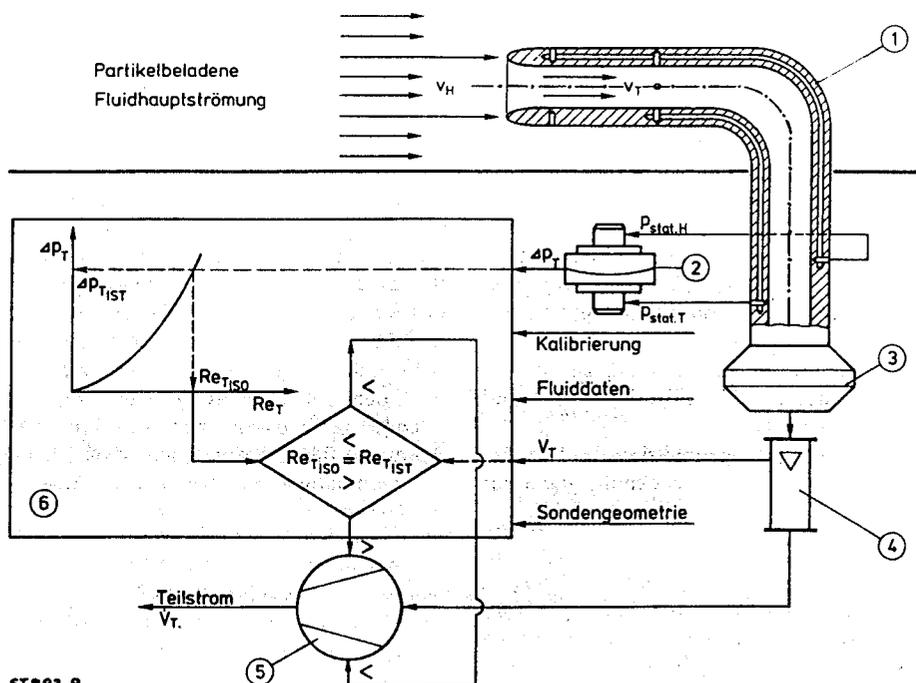


Bild 9: Verfahren zur geschwindigkeitsgleichen Absaugung (1: Absaugsonde, 2: Druckwandler, 3: Abscheider, 4: Durchflußgeber, 5: Absaugaggregat, 6: Regeleinheit)

## Verfahren zur geschwindigkeitsgleichen Absaugung mit Differenzdrucksonden

Abstand der Druckbohrungen von  $\Delta L = 12$  mm.

In Bild 8 ist der funktionelle Zusammenhang aus den Schnittpunkten der Bedingung  $v_T/v_H = 1$  mit den Kalibrierkurven dargestellt. Der Verlauf dieser Abhängigkeit, die als Tarierfunktion bezeichnet wird, weil später über den gemessenen tatsächlichen Teilvolumenstrom hieraus sich die erforderliche dynamische Tarierrgröße für den an der Sonde festzuhaltenden Differenzdruck ermittelt, ist abhängig von der Sondengeometrie, insbesondere vom Sondeninnendurchmesser  $D_T$ .

Bild 8 zeigt, daß sich im untersuchten Differenzdruckbereich eine Korrelation

$$\Delta p_T = \exp(a \cdot Re_T / (D_T^m - b)) \quad (6)$$

$$\text{für: } 0,7 \text{ mbar} < \Delta p_T < 4,0 \text{ mbar} \quad (7)$$

finden läßt, die unabhängig von den untersuchten Sonden gültig ist. Damit vereinfacht sich die Realisierung eines Differenzdruckabsaugverfahrens insbesondere im Hinblick auf die sonst unvermeidliche Kalibrierung jeder anderen neuen Sonde, wenn die Ausbildung des Sondenkopfes nach [7] erfolgt.

### 6 Verfahren zur geschwindigkeitsgleichen Absaugung

Aus diesen experimentellen Ergebnissen läßt sich das in Bild 9 gezeigte Verfahren zur Realisierung geschwindigkeitsgleicher Absaugung entwickeln.

Grundlegend für die Realisierung des Absaugverfahrens ist das Ziel, für einen Selbststeuerungsvorgang die Einflußfaktoren so zu organisieren, daß ihr Gefüge sich selbst steuert, d. h. eine automatische Struktur bekommt.

Der Effekt, der durch die Einrichtung erzielt werden soll, die sogenannte „Ausgangsgröße“, ist das konstante Verhältnis von Anström- zu Absauggeschwindigkeit, und zwar so, daß diese Geschwindigkeiten gleich sind. Das Verhältnis hängt von folgenden „Eingangsgrößen“ ab:

- von der Anströmsituation, gekennzeichnet durch Anströmrichtung und -geschwindigkeit,
- von der Sondengeometrie,
- von der Lage der Druckbohrungen zur

Messung der statischen Drücke an der Sondeninnen- und -außenwand und vom abgesaugten Teilvolumenstrom  $\dot{V}_T$ .

Mit Ausnahme des letzten Faktors entziehen sich alle anderen der unmittelbaren Steuerung und können sich deshalb grundsätzlich störend auswirken, weshalb sie als „Störgrößen“ bezeichnet werden. Der abzusaugende Teilvolumenstrom ist dagegen die „Regelgröße“.

Der durch die Sonde aus der Hauptströmung abgesaugte Teilstrom wird in einem Filter oder anderen Abscheider von mitgeführten Partikeln befreit und nach der Erfassung des Teilvolumenstromes  $\dot{V}_T$  über das Absaugaggregat abgeführt. Die gemessene Teilstromgeschwindigkeit  $v_T$  wird als Ist-Größe der Regeleinheit zugeführt. Gleichzeitig steht als aktuelle zweite Meßgröße die Differenz  $\Delta p_T$  der von der Sondenmündung über Druckbohrungen ermittelten statischen Drücke von Haupt- und Teilstrom an der Regeleinheit an.  $\Delta p_T$  wird über die kalibrierte Tarierfunktion in die den zugehörigen Strömungszustand kennzeichnende isokinetische Reynolds-Zahl  $Re_{T, iso}$  umgewandelt. Der Vergleich mit der aus der Teilstrommessung verfügbaren tatsächlichen Strömungskennzahl  $Re_{T, ist}$  ermöglicht die permanente Führung des Absaugaggregates im isokinetischen Betriebszustand durch die fallweise zwangsläufig bewirkte Erhöhung bzw. Drosselung des abgesaugten Teilvolumenstromes  $\dot{V}_T$ .

Es resultiert ein charakteristisches kybernetisches System:

Die erwähnten Eingangsgrößen werden so behandelt, daß sie als Wirkungsgrößen die Regelung mit dem Ziel auslösen, die Ausgangsgröße, nämlich die Geschwindigkeitsgleichheit von Teil- und Hauptstrom, auf ihre Ursache, den abgesaugten Teilvolumenstrom, nach dem Zweckmäßigkeitsgesetz eines kalibrierten Differenzdruckes zwischen den statischen Drücken im Haupt- und Teilstrom zurückzukoppeln und so ihre eigene Verursachung nach dem Selbststeuerungsprinzip regeln.

Diese geschlossene Kreisstruktur eines Absaugverfahrens ermöglicht damit nach einer einmaligen Kalibrierung die Anwen-

dung einer Absaugsonde zur geschwindigkeitsgleichen Teilstromentnahme aus beliebigen, vorher nicht bekannten Zweiphasenströmungssystemen.

Mit diesem Verfahren wird es auch möglich, die beiden bekannten Gruppen sondentechnischer Meßmethoden, nämlich Rückwirkungs- und Absaugsonden zu Mehrkomponentensonden zusammenzufassen und für komplexere Aufgabenstellungen einsetzbar zu machen [8].

**Danksagung:** Ein Teil der Mittel zur Durchführung des Vorhabens stand im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 62 der Universität (TH) Karlsruhe zur Verfügung. Prof. Dr.-Ing. Kurt Leschonski verdanke ich wertvolle Anregungen und eine stetige Förderung. Die Mitarbeiter des Lehrstuhls für Mechanische Verfahrenstechnik der TU Clausthal haben mich ausdauernd unterstützt. Meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. M. Heuer und Dipl.-Ing. U. Menzel danke ich für die Mitarbeit bei der Durchführung der Versuche in der *Aerodynamischen Versuchsanstalt der DFVLR* in Göttingen. [ST 893]

### Schrifttum

- [1] Röthele, S., und K. Leschonski: Sondenmessungen in Zweiphasenströmungen - Stand der Technik. Proc. 5th POWTECH, Basel, 7. 3. 1978, S. 71/91.
- [2] Böhner, M.: Staubgehaltsbestimmung in strömenden Gasen mit Absaug-Sonden. Chemie-Ing.-Techn. 39 (1967), S. 972/77.
- [3] Badzioch, S.: Collection of gas-borne dust particles by means of an aspirated sampling nozzle. Brit. J. Appl. Physics 10 (1959), p. 26/32.
- [4] Rüping, G.: Die Bedeutung der geschwindigkeitsgleichen Absaugung bei der Staubstrommessung mittels Entnahmesonden. Staub-Reinhalt. Luft 28 (1968) Nr. 4, S. 137/44.
- [5] Zenker, P.: Untersuchungen zur Frage der nichtgeschwindigkeitsgleichen Teilstromentnahme bei der Staubgehaltsbestimmung in strömenden Gasen. Staub-Reinhalt. Luft 31 (1971) Nr. 6, S. 252/56.
- [6] Narjes, L.: Anwendung neuartiger Nulldrucksonden zur quasiisokinetischen Staubprobenahme in Dampfkraftanlagen. Staub-Reinhalt. Luft 25 (1965) Nr. 4, S. 148/53.
- [7] Fernandes, E., und P. Suter: Absaugsonden für Gas/Partikel-Suspensionen ohne Störung der Zuströmung. Brennstoff-Wärme-Kraft 26 (1974) Nr. 12, S. 502/506.
- [8] Leschonski, K., und S. Röthele: A new probe for highly concentrated gas-solid-flow-systems. Int. In-Stream-Measurement Symp. Bergen (1978) Vol. II, C6, p. 1/18.